

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA NASCIMENTO DE VASCONCELLOS

ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS INDIVIDUAIS DE  
*Araucaria angustifolia* POR MEIO DE DADOS LASER SCANNER AÉREO E  
TERRESTRE

CURITIBA

2020

BRUNA NASCIMENTO DE VASCONCELLOS

ESTIMATIVA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS INDIVIDUAIS DE  
*Araucaria angustifolia* POR MEIO DE DADOS LASER SCANNER AÉREO E  
TERRESTRE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Florestal, Área de Concentração: Manejo Florestal

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Dalla Corte

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Behling, Prof. Dr. Carlos Alberto Silva, Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta.

CURITIBA, 2020

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Vasconcellos, Bruna Nascimento de

Estimativa de variáveis dendrométricas individuais de *Araucaria angustifolia* por meio de dados laser scanner aéreo e terrestre / Bruna Nascimento de Vasconcellos. - Curitiba, 2020.

166 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte

Coorientadores: Prof. Dr. Alexandre Behling; Carlos Alberto Silva

Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 24/04/2020. Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Levantamentos florestais. 2. Florestas - Medição. 3. Dendrometria. 4. *Araucaria angustifolia*. 5. Lasers. 6. Sensoriamento remoto. 7. Teses. I. Dalla Corte, Ana Paula. II. Behling, Alexandre. III. Silva, Carlos Alberto. IV. Sanquetta, Carlos Roberto. V. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. VI. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.524.6

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **BRUNA NASCIMENTO DE VASCONCELLOS** intitulada: **Estimativa de variáveis dendrométricas individuais de *Araucaria angustifolia* por meio de dados Laser Scanner aéreo e terrestre.**, sob orientação da Profa. Dra. ANA PAULA DALLA CORTE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Abril de 2020.

Assinatura Eletrônica

14/05/2020 16:22:55.0

ANA PAULA DALLA CORTE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/05/2020 16:29:00.0

JOSILÉIA ACORDI ZANATTA

Avaliador Externo (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA  
AGROPECUÁRIA)

Assinatura Eletrônica

15/05/2020 17:01:32.0

VAGNER ALEX PESCK

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE)

Assinatura Eletrônica

18/05/2020 16:00:26.0

NELSON YOSHIHIRO NAKAJIMA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

12/05/2020 15:52:52.0

ALEXANDRE BEHLING

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Ao meu amado avô Luiz Hevando Nascimento (*in memoriam*),  
que muito me deu força, amor e incentivo para estudar.  
Meu maior exemplo de honestidade e determinação,  
O qual tenho certeza que está na plateia do reino dos céus,  
aplaudindo orgulhoso o resultado desse trabalho...

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Gratidão a vida, em suas diversas formas! A Deus e todos os seres de luz que me acompanham!

A população brasileira, que por meio do pagamento de tantos impostos, permitiu que toda a minha titulação acadêmica fosse realizada em universidades públicas, gratuitas e de qualidade.

A UFPR, pela oportunidade de realização do doutorado, mas muito além disso, por contribuir para que eu me tornasse uma cidadã do bem, consciente na luta contra as injustiças sociais, racismo, intolerância religiosa, e toda e qualquer forma de preconceito.

Ao meu comitê de orientação Prof. Dra. Ana Paula Dalla Corte, Prof. Dr. Alexandre Behling, Prof. Dr. Carlos Alberto Silva, Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta, pela oportunidade, orientação e apoio para a realização dessa pesquisa. Agradeço também por todo o aprendizado e bons momentos compartilhados ao longo desses quatro anos.

A Embrapa Florestas, pela inclusão no Projeto Saltus, pela disponibilidade do laser scanner terrestre e apoio técnico no processamento de dados, em especial ao Wilson Holler, que muito colaborou na consolidação dessa pesquisa.

Ao Serviço Florestal Americano (USDA – Forest Service), pela oportunidade de realização do doutorado sanduíche, em especial ao pesquisador Andrew Hudak, por todo o apoio, pelos ensinamentos e acolhimento em Moscow. E ainda, aos demais pesquisadores do USDA, em especial Ina Sue Muller, Joane, Mary, Benjamin, Rachel, Marcus, Bill, Emily, todos que foram sempre muito receptivos e atenciosos durante minha estadia nos Estados Unidos.

A minha equipe de campo, Marieli, Paulo Henrique, Iasmin, Naiany, Gabriel, Isabela Landim, Isabella Erzinger, Tiemi e Verônica, sem a ajuda de vocês essa pesquisa não se concretizaria! Obrigada por terem tornado esse trabalho mais leve, por todos os momentos de descontração no campo, mesmo quando o cansaço tomava conta.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos e a Capes pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche.

Aos meus amados avós, por serem luz na minha vida, por serem sempre amor! A minha doce vó Lila, luz dos meus olhos, que sempre me incentivou nos estudos, que muito me deu colo, quando necessário sempre acendia aquela velinha e fazia aquela prece. Ao meu amado vô Luiz (*in memoriam*), que fez a passagem no final dessa jornada, mas sempre foi um dos meus maiores exemplos de vida.

Aos meus pais Mariza e Amilton, por terem sido meu suporte ao longo desses anos, por todo incentivo, amor, carinho e dedicação. Por serem a minha base, e por me permitirem sempre ter “para onde voltar”. A minha “boadrasta” Ana

Paula, por também ter sido um pouco minha mãe, por todo o carinho e amizade, sempre me incentivando a ir em busca dos meus sonhos.

Aos meus irmãos Arthur e Rafael, os grandes amores da minha vida, aqueles que me ensinam sobre amor genuíno e me mostram diariamente que a felicidade se encontra nas coisas mais simples da vida.

A minha iluminada tenda espiritualista caboclo do pai 7, que por diversas vezes me alimentou a alma e transformou minha visão de mundo. Gratidão pelo aconchego, paz e principalmente, pelo grande crescimento como pessoa!

Ao primo irmão Thales, por ser alguém que está muito além do laço de sangue que nos une, por me trazer conforto e apoio emocional sempre que preciso, e principalmente por sempre me lembrar que eu sou capaz de conquistar o mundo.

A minha amiga Lueni, que mesmo distante fisicamente, sempre me trouxe muita tranquilidade emocional e apoio fraterno em cada etapa, sempre me incentivou a acreditar na minha capacidade de encarar os desafios. Sou grata pela tua existência, irmã!

A minha amiga Marieli, que além de ser minha companheira de mates e longas conversas filosóficas sobre a vida, me ensinou a olhar as florestas além dos olhos!

As minhas amigas Luani e Sarah, que dividiram o lar comigo, entretanto mais do que isso, agradeço por toda a parceria, pelas longas conversas que iniciavam sobre dúvidas estatísticas e terminavam em mapa astral, *reiki*, e movimentos do universo. Gratidão *Hermanas*!

Ao meu amigo Franciel, por todas as boas histórias vividas, por todos os perrengues partilhados, pelas boas risadas, viagens e companheirismo.

As boas amizades que Curitiba me trouxe! Luis Antônio, Jaque, Ana Paula, Leandro, Rubya, Cris Boscaro, Cris Borso, Alessandra, Arianne, Carol, Deborah, Vitória, obrigada por trazerem leveza para os meus dias!

A técnica e amiga Maria Emilia, pelas infinitas conversas, pelo apoio, por ter me ajudado por inúmeras vezes, por todas as palavras de incentivo e bom humor constante. Obrigada por ser luz!!

A Luiza Scotti Cansi, por toda sabedoria compartilhada, por me ajudar a olhar com amor e honrar toda essa caminhada, independente do quão pesada tenha sido em diversos momentos!

A minha amiga Manu, por todos os debates saudáveis, que também nos fizeram crescer. Obrigada pelos mates no Botânico, o colo amigo e o sorriso no rosto.

Agradeço infinitamente a todas as pessoas generosas que encontrei nessa caminhada... Vocês não imaginam o quanto eu termino esse ciclo mais forte, mais espiritualizada, mais humana. A minha eterna gratidão a todos que estiveram comigo neste período, contribuindo direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

*“Se a gente cresce com os golpes duros da vida,  
também podemos crescer com os toques suaves na alma.”*

*Cora Coralina*



## RESUMO

A tecnologia LiDAR (*light detection and ranging*) está sendo muito utilizada no setor florestal, porém, os estudos aplicados em florestas nativas do Brasil ainda são incipientes, principalmente em relação ao *laser scanner* terrestre (TLS). O objetivo principal deste estudo foi estimar variáveis dendrométricas: altura, diâmetro a 1,30 m do solo (dap), volume e biomassa acima do solo de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze utilizando dados LiDAR e modelos de estrutura quantitativa. Além disso, estabeleceu-se um protocolo de coleta de dados LiDAR em florestas naturais do Brasil, testou-se a redução da densidade da nuvem de pontos e, ainda, realizou-se a integração de dados de *laser scanner* aéreo (ALS) e TLS no intuito de obter resultados mais acurados em relação aos obtidos com eles individualmente. O estudo foi desenvolvido em um fragmento de 15,24 ha de Floresta Ombrófila Mista urbana, localizado no Campus III da UFPR. Inicialmente, foram processados os dados ALS, gerou-se o modelo digital do terreno (MDT), modelo digital de superfície (MDS) e *canopy height model* (CHM) e, a partir disso, foram delimitadas as parcelas a serem inventariadas com o TLS e inventário florestal convencional (IFC). Realizou-se o levantamento TLS, registro da nuvem de pontos, filtragem, segmentação dos indivíduos de araucária e a aplicação do algoritmo TreeQSM para modelagem tridimensional das árvores. Foram estimados valores de diâmetro a 1,30 m do solo (dap) e altura total utilizando o TLS e mensurados em campo (IFC), ao aplicar análise estatística multivariada, por meio do Teste  $T^2$  de Hotelling, constatou-se que não houve diferença estatística entre os métodos a nível 99% de significância. Obteve-se a raiz do erro quadrático médio (RMSE) de 5,31% entre os dados observados, um viés de 3,32% e uma precisão de 7,94%. Quanto à reamostragem da nuvem de pontos, foram testados os métodos *octree*, espacial e aleatório, sendo o método *octree* o único que apresentou perda estrutural das árvores, impossibilitando a modelagem tridimensional com o algoritmo TreeQSM. A integração entre os dados ALS e TLS possibilitou estimar a biomassa acima do solo em função da área de copa mais acurados em relação aos estimados com TLS e ALS individualmente. Os resultados evidenciaram que, tanto o TLS quanto o ALS são ferramentas excelentes para estimativas acuradas de variáveis dendrométricas, assim como a tecnologia LiDAR possibilita a geração de estimativas acuradas da floresta, tanto em micro quanto em macroescalas. Os modelos de estruturas quantitativas são capazes de gerar uma modelagem tridimensional da árvore com grande acurácia, possibilitando que se tenha informações a qualquer altura, bem como de volume e afilamento.

Palavras-chave: Mata Atlântica, LiDAR, Sensoriamento Remoto, Floresta nativa, Biomassa acima do solo.

## ABSTRACT

LiDAR (light detection and ranging) technology have been used a lot in the forestry sector, however, studies applied in native forests in Brazil are still incipient, especially about to the terrestrial laser scanner (TLS). The main objective of this study was to estimate dendrometric variables and above-ground biomass of *Araucaria angustifolia* using LiDAR data and quantitative structure models. In addition, a LiDAR data collection protocol was established in natural forests in Brazil, the reduction of the point cloud density was tested, and the integration of ALS and TLS data was carried out in order to obtain more accurate results in relation to those obtained with ALS and TLS individually. The study was conducted in a 15.24 ha fragment of mixed urban ombrophilous forest, deominated Capão do Tigre, located on Campus III of UFPR. Initially, ALS data were processed, DTM, DSM and CHM were generated, and from that, the parcels to be inventoried with TLS and IFC were delimited. The TLS survey, point cloud registration, filtering, Araucaria segmentation and application of the TreeQSM algorithm were performed. Dbh and height values were estimated using the TLS and measured in the field (IFC), so that, there was no statistical difference between the methods, an RMSE of 5.31% was obtained between the observed data, a bias of 3, 32% and an accuracy of 7.94%. As for resampling of the point cloud, the octree, spatial and random methods were tested, with the octree method being the only one that presented structural loss of the trees, making three-dimensional modeling with the TreeQSM algorithm impossible. The integration between ALS and TLS data enabled the generation of above-ground biomass estimates as a function of the more accurate canopy area in relation to those estimated with TLS and ALS individually. The results of all chapters showed that both TLS and ALS are excellent tools for estimating dendrometric variables accurately, so that it is concluded that LiDAR technology allows the generation of accurate forest estimates, both in a micro and macro-scale. The models of quantitative structures are capable of generating a three-dimensional modeling of the tree with great accuracy, making it possible to have information at any time, and information on volume and tapering.

Keywords: Atlantic Forest, LiDAR, Remote Sensing, Natural forest, above-ground biomass.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DE ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	5
FIGURA 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS PARA A ESCOLHA DE NOVAS TÉCNICAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL.....	8
FIGURA 3 - TIPOS DE PLATAFORMA LIDAR APLICADOS AO SETOR FLORESTAL .....	9
FIGURA 4 - ESCALA, ABRANGÊNCIA E ACURÁCIA DA TECNOLOGIA LIDAR EM DIFERENTES PLATAFORMAS .....	11
FIGURA 5 - APLICAÇÃO DO TLS PARA EXTRAIR E DERIVAR ORDENS DE RAMIFICAÇÃO E PARÂMETROS DE ARQUITETURA DE ÁRVORE.....	16
FIGURA 6 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM LIDAR NO BRASIL .....	24
FIGURA 7- ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM LIDAR NO BRASIL.....	26
FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E REPRESENTAÇÃO VERTICAL DA FLORESTA.....	32
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA REALIZADA .....	33
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DAS PARCELAS IMPLANTADAS .....	34
FIGURA 11 - APLICAÇÃO DO CHM E ESCOLHA DAS PARCELAS .....	35
FIGURA 12- REPRESENTAÇÃO DAS ETAPAS REALIZADAS NO CAMPO ..	37
FIGURA 13 - NUVEM DE PONTOS BRUTA E COM PRÉ-PROCESSAMENTO PARA PARCELA REFERENTE À ÁREA DE ESTUDO .....	41
FIGURA 14 - LEVANTAMENTO COM O LIDAR SCENE FARO 330X E REPRESENTAÇÃO DE ESFERAS COLORIDAS.....	42
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO LIDAR A NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL .....	44
FIGURA 16: REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DAS ESFERAS E FITA REFLETIVA.....	45
FIGURA 17 - RAMIFICAÇÕES ESTABELECIDAS PELO ALGORITMO TREEQSM.....	56
FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO DE ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	61
FIGURA 19- REPRESENTAÇÃO DE ÁRVORE COM FALHAS NA NUVEM DE PONTOS, NA ESQUERDA (A) A OCLUSÃO IMPOSSIBILITA A APLICABILIDADE DO ALGORITMO, NA DIREITA (B) A OCLUSÃO NÃO TEM INFLUÊNCIA NO PROCESSAMENTO DE DADOS .....	62

FIGURA 20 - RECONSTITUIÇÃO TRIDIMENSIONAL DA ARAUCÁRIA GERADA PELO TREEQSM.....	63
FIGURA 21 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O DAP OBTIDO COM TREEQSM E INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL PARA ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	65
FIGURA 22 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A ALTURA OBTIDA COM O TREEQSM E O INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL PARA ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	66
FIGURA 23 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O VOLUME OBTIDO COM O TREEQSM E O INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL DA Araucaria Angustifolia EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBROFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	68
FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DE EQUAÇÕES UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO PARA <i>Araucaria angustifolia</i> .....	70
FIGURA 25 - ANÁLISE DE PERFIL MULTIVARIADA PARA <i>Araucaria angustifolia</i> .....	72
FIGURA 26- DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO DE ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	73
FIGURA 27- DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS DA AGB ESTIMADA PELO TLS .....	74
FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DA REDUÇÃO DA DENSIDADE DE PONTOS POR MEIO DO MÉTODO OCTREE, EXEMPLIFICADO COM 18 VOXELS.....	85
FIGURA 29- REPRESENTAÇÃO DA REDUÇÃO DA DENSIDADE DE PONTOS PELO MÉTODO ESPACIAL A) TESTEMUNHA B) 0,050 C)0.025 D) 0.010 .....	87
FIGURA 30 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO ALEATÓRIO PARA A REDUÇÃO DA DENSIDADE DE PONTOS A) TESTEMUNHA B) 75% C) 50% D) 25% E) 20% F)15% G) 10% H) 5%.....	88
FIGURA 31 - DELIMITAÇÃO DAS ARAUCÁRIAS NO EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO EM CURITIBA, POR MEIO DO CHM.....	101

FIGURA 32 – <i>Araucaria angustifolia</i> SCANEADA PELO TLS COM FALHAS NO DOSSEL EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR .....	103
FIGURA 33 - REPRESENTAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DE DADOS ALS E TLS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	104

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DE CADA ATBD DO GEDI .....	21
TABELA 2 - ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL UTILIZANDO A TECNOLOGIA LIDAR.....	26
TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA NUVEM DE PONTOS ALS..	33
TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DO CHM POR PARCELA ESTABELECIDADA EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANA EM CURITIBA - PR .....	36
TABELA 5 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CRITERION RD 1000 .....	39
TABELA 6 - MODELOS DE BIOMASSA TESTADOS.....	54
TABELA 7 - ESTATÍSTICA DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA .....	71
TABELA 8 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL E COM O TLS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR .....	71
TABELA 9 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MODELOS TESTADOS PARA REAMOSTRAGEM DO DAP (CM) DAS ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	89
TABELA 10 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MODELOS TESTADOS PARA REAMOSTRAGEM DA ALTURA (M) DE ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR.....	89
TABELA 11 - VALORES DE VIÉS (%), PRECISÃO (%) E ACURÁCIA (%) PARA OS MODELOS DE REAMOSTRAGEM TESTADOS .....	90
TABELA 12 - TESTE $T^2$ DE HOTELLING APLICADO AOS MODELOS EM RELAÇÃO A TESTEMUNHA .....	91
TABELA 13 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS TRÊS CENÁRIOS TESTADOS PARA ÁREA DE COPA.....	102
TABELA 14 - EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE DAP BASEADO EM CLASSES DE ÁREA DE COPA.....	105

TABELA 15- VALORES DE AGB PARA OS TRÊS CENÁRIOS ( ALS, TLS E INTEGRAÇÃO) COMPARADOS AOS VALORES OBTIDOS PELO INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR .....	106
TABELA 16 - RELAÇÃO DE TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM LIDAR E ACURÁCIA .....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Área de copa

AGB – Biomassa acima do solo

ALS – Laser scanner aerotransportado

CHM – *Canopy Height Model*

dap – diâmetro a 1,30m de altura

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FOM – Floresta Ombrófila Mista

GEDI - *Global Ecosystem Dynamics Investigation*

GPS - *Global Positioning Systems*

h - altura

IFC – Inventário Florestal Convencional

IMU - *Inertial Measurement Unit System*

ICESAT - *Ice, Cloud, and land Elevation Satellite*

TLS – Laser Scanner Terrestre

Laser – *Light Amplification by Stimulated of Radiation*

LiDAR – *Light Detection and Ranging*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

PTMS - *Personal Mobile Terrestrial System*

QSM – *Quantitative Structure Models* (modelos de estrutura quantitativa)

RMSE – *root mean square error* (erro médio quadrático)



RPA – Aeronave Remotamente Pilotada

SAR – *Radio Detection and Ranging*

vol – volume

VANTs – Veículos aéreos não tripulados

UFPR – Universidade Federal do Paraná

USDA – *United States Department of Agriculture*

3D – tridimensional

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL</b>	1
1.1 Objetivo geral da tese	3
1.2 Hipótese	3
1.3 Justificativa	3
1.4 Organização do trabalho	4
<b>2. CAPÍTULO I: REVISAO DE LITERATURA</b>	6
2.1 Inventário Florestal	6
2.2 Geotecnologias aplicadas ao inventário florestal	8
2.2.1 Tecnologia LiDAR	8
2.2.1.1 Laser scanner terrestre portátil	12
2.2.1.2 <i>Laser scanner</i> Terrestre (TLS)	12
2.2.1.3 <i>Quantitative Structure Models</i> (TreeQSM)	15
2.2.1.4 Principais pressupostos do método TreeQSM	17
2.2.1.5 Fontes de erro associadas à aplicação do TreeQSM	18
2.2.1.6 Laser scanner aéreo (ALS)	18
2.2.1.7 LiDAR embarcado em VANTs	19
2.2.1.8 Laser scanner orbital - GEDI	20
2.2.1.9 ICESat - 2	21
2.2.1.10 Integração entre ALS e TLS	22
2.3 Cenário atual de pesquisas utilizando a tecnologia LiDAR aplicado ao setor florestal no Brasil	23
<b>3. CAPÍTULO II: Aspectos operacionais desenvolvidos na coleta de dados utilizando LiDAR e Inventário Florestal Convencional em Floresta Ombrófila Mista</b>	28
3.1 Introdução	30
3.1.1 Objetivo geral	31
3.1.2 Objetivos específicos	31
3.2 Caracterização da área de estudo	31
3.3 Obtenção de dados com o Laser scanner aéreo (ALS)	33

3.4 Inventário Florestal convencional .....	34
3.4.1 Definição prévia das parcelas em ambiente SIG .....	34
3.4.2 Materialização das parcelas em campo .....	36
3.4.5 Cubagem de árvores em pé .....	38
3.4.6 Levantamento com o laser scanner terrestre (TLS) .....	39
3.4.6.1 Levantamento TLS a nível de parcela .....	39
3.4.6.2 Levantamento TLS a nível de árvore individual .....	43
3.4.6.3 Registro de nuvem de pontos .....	44
3.4.6.4 Extração de árvores individuais .....	46
3.4.6.5 Filtragem e remoção de ruídos .....	46
3.5 Conclusões .....	47
<b>4.0 CAPÍTULO III: Modelagem de biomassa acima do solo de <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze usando varredura a laser terrestre e modelos de estrutura quantitativa .....</b>	<b>48</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	50
4.2 Objetivos .....	52
4.2.1 Objetivo geral .....	52
4.2.2 Objetivos específicos .....	52
4.3 Hipótese .....	52
4.4 Material e métodos .....	52
4.4.1 Área de estudo e coleta de dados .....	52
4.4.2 Inventário florestal convencional .....	53
4.4.2.1 Estimativa de volume .....	53
4.4.2.2 Quantificação de biomassa .....	54
4.4.2.3 Inventário florestal com o laser scanner terrestre .....	54
4.4.2.4 Aplicação do TreeQsm .....	54
4.4.2.5 Análise estatística .....	56
4.5 Resultados e discussão .....	61
4.6 Conclusões .....	76

<b>5</b>	<b>CAPÍTULO IV: Análise da acurácia da redução da densidade da nuvem de pontos TLS para estimativa de variáveis florestais a nível de árvore individual</b>	<b>77</b>
5.1	Introdução	79
5.2	Objetivos	80
5.2.1	Objetivo geral	80
5.2.2	Objetivos específicos	80
5.3	Hipóteses	81
5.4	Material e métodos	81
5.4.1	Aquisição dos dados TLS	81
5.4.2	Reamostragem dos dados	81
5.4.3	Estimativa de h e dap dos dados reamostrados	83
5.4.4	Análise estatística dos modelos testados	84
5.5	Resultados e discussão	85
5.6	Conclusões	93
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO V: Integração de dados Laser scanner aéreo (ALS) e Laser scanner terrestre (TLS) para a geração de estimativas de biomassa acima do solo para <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze</b>	<b>94</b>
6.1	Introdução	96
6.2	Objetivos	97
6.2.1	Objetivo geral	97
6.2.2	Objetivos específicos	97
6.3	Hipóteses	97
6.4	Material e métodos	97
6.4.1	Processamento da nuvem de pontos ALS	98
6.4.2	Processamento da nuvem de pontos TLS	99
6.4.3	Integração de dados ALS e TLS	99
6.4.4	Estimativa de biomassa acima do solo para as Araucárias	100
6.4.5	Análise estatística	100
6.5	Resultados e discussão	101
6.6	Conclusões	109

<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>110</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXO 1 - CÓDIGO TREEQSM QUE FOI RODADO NO MATLAB .....</b>	<b>131</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A Floresta Ombrófila Mista (FOM) é caracterizada fitofisionomicamente pela coexistência de vegetação de origens tropical e subtropical, tendo essa formação florestal sofrido grande fragmentação no século XX, devido à intensidade da exploração madeireira, principal atividade econômica no Sul do Brasil durante esse período. Atividades como desmatamentos e queimadas, substituição da vegetação por pastagens e agricultura, plantios homogêneos com espécies exóticas e ampliação das zonas urbanas, também contribuíram para a redução das áreas de florestas originais (MARTINS, 2017).

Até meados dos anos 2000, a cobertura florestal restante era de aproximadamente 0,7% da área original (MEDEIROS et al., 2005, PROBIO, 2013). Com a recorrente perda de áreas florestais e, conseqüentemente, de sua biodiversidade, destaca-se que o conhecimento das florestas é importante na tomada de decisão, planejamento territorial e comercial, por isso possui grande importância. Dessa forma, por meio do inventário florestal pode-se analisar qualitativamente e quantitativamente as espécies de uma floresta, podendo ser realizado com diferentes finalidades: botânica ou ecológica, ou ainda, referente à análise quantitativa de biomassa (SOUZA, 2007; AMORIM, 2016; MARTINS, 2017).

Diante da necessidade de informações detalhadas, atualizadas e confiáveis sobre os recursos florestais, utiliza-se de métodos baseados em amostras para estimar atributos relevantes, como a densidade, a altura e o volume de madeira. O uso de sensores remotos melhorou os métodos de amostragem terrestre, permitindo uma melhor avaliação dos recursos florestais em várias escalas (BREIDENBACH e ASTRUP, 2012). A tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) é uma tecnologia particularmente útil para a caracterização precisa de atributos florestais em resoluções que variam em nível de parcela e de árvore.

A tecnologia LiDAR pode fornecer estimativas acuradas para descrever a estrutura da floresta, devido à sua capacidade de fornecer informações tridimensionais detalhadas em torno da estrutura da floresta e do terreno

subjacente. Esses dados são considerados a forma mais útil de sensoriamento remoto para inventário florestal. Desse modo, essa tecnologia está sendo cada vez mais utilizada como uma alternativa para a detecção remota de recursos florestais, bem como para obtenção de estimativas de biomassa acima do solo (AGB) e de variáveis dendrométricas (SINGH et al., 2015; PEARSE et al., 2018).

Alguns autores consideram que o uso de dados LiDAR possibilitaria a superação de erros e incertezas associados a modelos alométricos e empíricos tradicionalmente utilizados em levantamentos florestais e estimativas de carbono e biomassa (CALDERS et al., 2015; NEWNHAM et al., 2015). Além disso, diversos trabalhos sugerem a utilização de sistemas *Laser Scanner* Aéreo (ALS), *Laser Scanner* Terrestre (TLS) e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como abordagens complementares, uma vez que dados florestais locais coletados por meio de TLS podem ser usados como referência para a calibração de dados de inventário de grandes áreas medidos por satélite e sistemas baseados em VANTs e ALS (FERRARA, 2018).

Devido ao complexo ambiente das florestas tropicais, as medições do estoque de carbono e biomassa ainda são difíceis de realizar e repletos de incertezas. Tais incertezas derivam da mensuração das variáveis das árvores, fundamentalmente associadas às estimativas de altura e diâmetro a 1,30 m de altura (dap) (LARJAVAARA e MULLER-LANDAU, 2013). Considera-se que, medições individuais de altura totais de árvores usando métodos tradicionais baseados em campo estão associados a erros devido à natureza estrutural das florestas tropicais, o que dificulta a visão das copas das árvores.

Uma crescente necessidade de mapeamento espacial e estimativa mais precisa do carbono florestal está sendo parcialmente compensada pelas recentes tecnologias de observação da Terra. A tecnologia LiDAR, é capaz de medir diretamente as variáveis de inventário florestal com alta precisão. O uso dessas tecnologias de *laser* está se tornando uma escolha primordial para estimar o AGB de floresta remotamente detectado em comparação com sensores remotos ópticos que têm problemas de saturação em respostas espectrais a copas densas com alta biomassa.

Os trabalhos de pesquisa utilizando LiDAR estão concentrados nas áreas florestais dos países do Norte da Europa, Estados Unidos e Canadá. Em função

disso, pretende-se testar a aplicabilidade da tecnologia LiDAR na Floresta Ombrófila Mista, pois ela apresenta uma grande diversidade de espécies, além da complexidade da estrutura das árvores e alta densidade de indivíduos. O presente estudo aplica-se a espécie *Araucaria angustifolia*, tal estudo tem o intuito de testar e estabelecer um protocolo de procedimentos para uso do LiDAR em florestas nativas, com ênfase no Bioma Mata Atlântica.

### 1.1 Objetivo geral da tese

O objetivo geral desta pesquisa foi estimar as variáveis dendrométricas individuais, sendo: altura, diâmetro a 1,3 m, volume e biomassa acima do solo da *Araucaria angustifolia* utilizando dados LiDAR e modelos de estruturas quantitativas (QSM), bem como avaliar a acurácia em relação às métricas estimadas por meio de inventário florestal convencional.

### 1.2 Hipótese

É possível utilizar a tecnologia LiDAR e modelos de estruturas quantitativas para modelar tridimensionalmente (3D) e obter variáveis dendrométricas acuradas para *Araucaria angustifolia*.

### 1.3 Justificativa

A maioria dos estudos de aplicação de dados LiDAR para estimativa de variáveis florestais vêm sendo desenvolvidos em áreas homogêneas, com baixa e média densidade de indivíduos. De um modo geral, os estudos envolvendo a aplicação da tecnologia LiDAR na Floresta Ombrófila Mista ainda são incipientes; tendo em vista que foram desenvolvidos apenas utilizando o ALS, de modo que, não foram encontrados na literatura estudos utilizando o TLS, o que representa o principal diferencial dessa pesquisa.

Evidencia-se a necessidade de estudos aplicando a tecnologia LiDAR em florestas naturais do Brasil, visto que os trabalhos que utilizam tal tecnologia como alternativa de inventariar a floresta vêm crescendo consideravelmente, porém, no que se refere aos estudos realizados em florestas naturais, como é o caso do Bioma Mata Atlântica, ainda são insuficientes. O aprimoramento e



desenvolvimento da técnica permitirá operacionalizar a tomada de informações, e consequentemente irá reduzir o trabalho de campo e os erros nas medições.

O Brasil é detentor de grandes áreas florestais, logo, a presente proposta trata de uma perspectiva de propiciar uma informação de alta qualidade da estrutura florestal, melhorar as estimativas das reservas de biomassa e carbono, o que é considerado de grande interesse para o setor florestal brasileiro.

Além disso, os modelos de estrutura quantitativa representam uma nova ferramenta para otimizar o processamento de dados LiDAR, tendo em vista que por meio de programação computacional é possível automatizar as medições de variáveis dendrométricas a nível de árvore individual obtidas com o laser scanner. Ainda, falta entendimento adequado sobre o desempenho do TLS, especialmente em florestas com estruturas e estágios de desenvolvimento variáveis (estruturas florestais complexas), como é o caso da Floresta Ombrófila Mista. Atualmente, os resultados obtidos a partir de dados de TLS para estimativa de atributos de árvore em termos de parcelas variaram significativamente entre as pesquisas desenvolvidas (PFEIFER et al., 2017).

Em função da estrutura biofísica complexa das florestas tropicais, o uso integrado de ALS e TLS oferece a possibilidade de detectar árvores sob diferentes condições de dossel para medições de variáveis dendrométricas mais acuradas. Logo, a presente pesquisa é de suma importância, considerando a carência de estudos utilizando a tecnologia LiDAR em florestas nativas do Brasil, principalmente ao que se refere ao TLS, e ainda, por utilizar modelos de estruturas quantitativas na modelagem individual da árvore, propiciando um maior detalhamento tridimensional da árvore.

#### 1.4 Organização do trabalho

O presente estudo foi desenvolvido em cinco capítulos, sendo o capítulo 1 referente a uma revisão bibliográfica dos assuntos que fazem parte do escopo desta pesquisa, tendo como ênfase a aplicabilidade da tecnologia LiDAR no setor florestal.

No capítulo 2, foi apresentada a descrição da área de estudo, bem como os métodos adotados em campo para a coleta de dados utilizando a tecnologia

LiDAR e o inventário florestal convencional (IFC). Nesse mesmo capítulo, foi descrita a elaboração do pré-processamento, no qual os dados foram submetidos inicialmente ao registro e a união de varreduras, segmentação de árvores individuais e remoção de ruídos para o TLS, bem como a aplicação do CHM para o ALS.

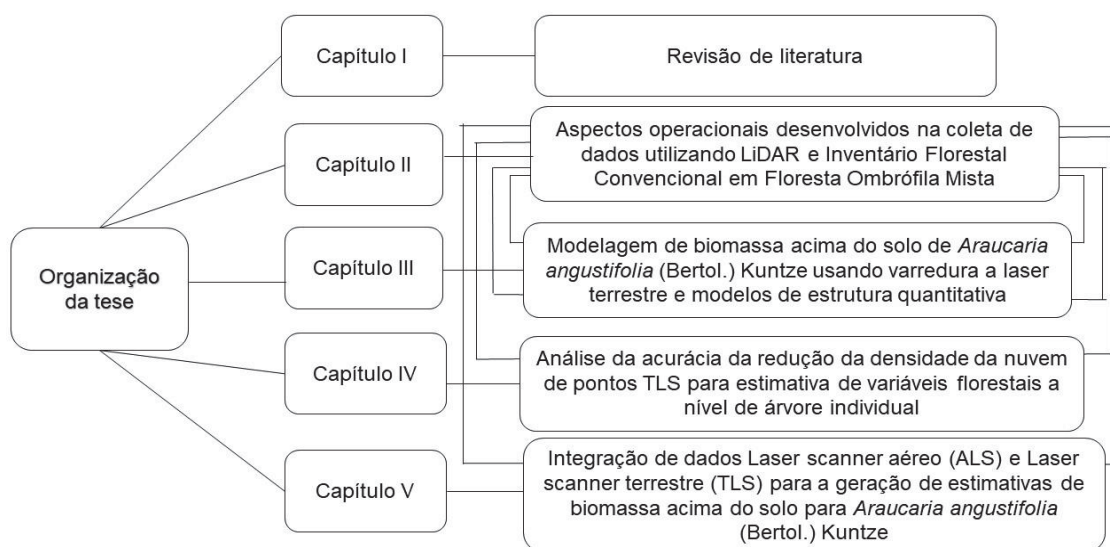
O capítulo 3 teve como objetivo modelar a biomassa individual acima do solo de *Araucaria angustifolia* utilizando TLS e modelos de estrutura quantitativa.

O capítulo 4 teve como objetivo testar a redução da densidade de pontos TLS no intuito de otimizar o processamento de dados mantendo a acurácia para as variáveis altura e diâmetro a 1,3 m (dap).

O capítulo 5 teve o objetivo de integrar dados provenientes do *laser scanner* aéreo (ALS) e *laser scanner* terrestre (TLS), visando a geração de estimativas de biomassa aérea individual acima do solo para *Araucaria angustifolia*.

Em síntese, a organização do presente estudo está apresentado na Figura 1.

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DE ORGANIZAÇÃO DA TESE



FONTE: Elaborado pela autora

## 2. CAPÍTULO I: REVISAO DE LITERATURA

### 2.1 Inventário Florestal

De acordo com Péllico Netto e Brena (1997), inventário florestal é uma atividade que visa obter informações qualitativas e quantitativas dos recursos florestais existentes em uma área pré-especificada. Os autores consideram que inventário florestal pode ser qualquer tipo de levantamento florestal, porém, a marca registrada de um inventário é a sua representatividade amostral e a sua validade estatística.

O inventário florestal fornece informações necessárias para o manejo florestal e políticas florestais em diferentes escalas. Projetos de amostragem ao realizar inventários de campo em florestas são eficientes, porém, a busca por otimização de resultados tem sido abordada há muito tempo (PICARD et al., 2018).

As florestas apresentam uma grande importância, tanto na manutenção de serviços como na produção de bens, são necessários meios eficientes para obter-se informações qualitativas e quantitativas. Para tanto, é necessário a realização de inventários florestais, os quais podem produzir variadas informações (mapeamento de propriedades, estimativas quantitativas e qualitativas dos recursos florestais, estimativas de crescimento, informações sobre a fauna), de acordo com o seu objetivo (SOARES et al., 2006 citado por LARANJA, 2016).

Os métodos de inventário florestal têm sido amplamente utilizados para estimar biomassa acima do solo em técnicas tradicionais, seja por meio de amostragem destrutiva ou pela medição de variáveis estruturais da floresta relacionadas à biomassa e um subsequente emprego de equações alométricas. No entanto, esses métodos são frequentemente trabalhosos e demorados, e não geram mapas contínuos do AGB sobre a paisagem (KELLER et al., 2001; CLARK e KELLNER, 2012). Portanto, há interesse em mensurar a biomassa em escala de campo e os parâmetros florestais medidos remotamente

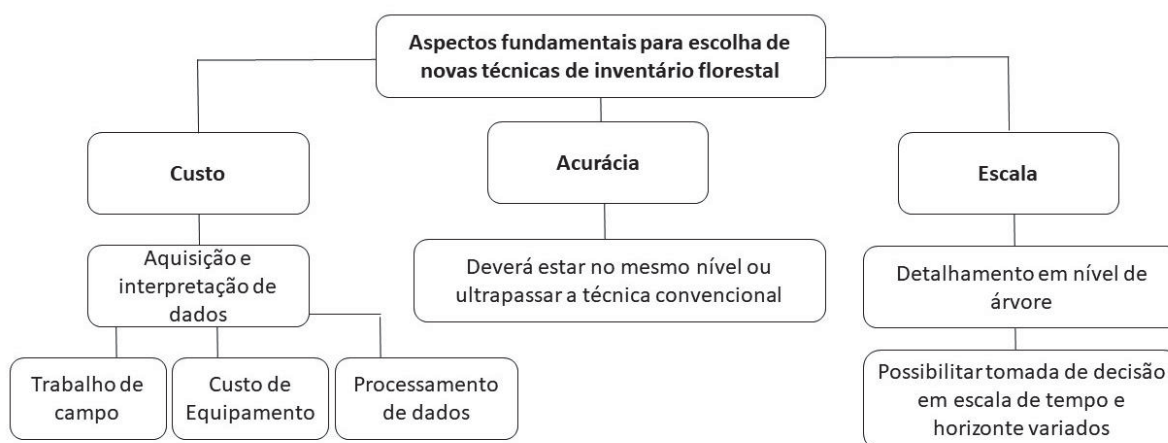
(em especial a altura) para fornecer mapeamentos de biomassa acima do solo mais eficientes em grandes áreas (HUANG et al., 2012).

Lingnau et al. (2008), consideram que no inventário florestal, a obtenção de variáveis dendrométricas é realizada em campo por meio de amostragens, as quais demandam tempo e uma equipe treinada para tais medições. As medições referentes às alturas das árvores são realizadas em apenas algumas árvores, por se tratar de uma obtenção muito difícil em campo. Muitas vezes, o ápice da copa e a base da árvore não podem ser visualizados com nitidez ou certeza, podendo haver erros nas medições, causando super ou subestimativas. Na medição de diâmetros, erros na calibração de sutas ou fitas métricas, e erros aleatórios causados na anotação de dados são comuns e causados essencialmente por falhas humanas. Diante disso, o desenvolvimento de novos métodos, buscando-se a automatização da obtenção das variáveis dendrométricas, visa uma menor demanda de tempo, mantendo uma boa precisão e eliminando os possíveis erros causados pelo homem.

As áreas de amostragem de florestas são tipicamente uma pequena área, as informações são geralmente coletadas por meio de medições árvore por árvore. As principais informações consistem em atributos das árvores, como espécie, diâmetro à 1,30m de altura (dap) e altura total da árvore. Nas práticas atuais de inventário, as medidas de árvore por árvore são, na maioria das vezes, agregadas às médias e totais do nível da parcela. O avanço dos inventários de campo florestal foi considerado lento no passado, porém, sofreu uma grande mudança nas últimas duas décadas, devido à introdução de geotecnologias, bem como imagens de satélite, VANTs e dados LiDAR.

De acordo Liang et al. (2016) três aspectos fundamentais moldam a adaptação de qualquer nova técnica de medição de informação de árvore e parcelas amostrais em inventários florestais, sendo custo, acurácia e escala, conforme pode ser visualizado na Figura 2.

FIGURA 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS PARA A ESCOLHA DE NOVAS TÉCNICAS DE INVENTÁRIO FLORESTAL



FONTE: Elaborado pela autora, adaptado de Liang et al. (2016)

Considera-se que o custo da aquisição e interpretação de dados deve ser acessível. De modo que, os custos são originados principalmente do equipamento, tempo de consumo de dados (por exemplo, trabalho de campo) e pós-processamento desses dados obtidos. A precisão da estimativa do atributo de árvore deve estar no mesmo nível ou ultrapassar a técnica convencional, ou seja, o valor agregado ganho da nova técnica deve ser significativo. Além disso, a técnica deve focar principalmente nos atributos de árvores que são importantes para a tomada de decisões de manejo florestal em escalas e horizontes de tempo variados. Esses três fatores interagem intimamente, de modo que, o custo minimizado geralmente leva a uma quantidade menor de atributos de árvore medidos. A maior precisão geralmente requer dados melhores e os custos de medição, então, aumentam consequentemente.

## 2.2 Geotecnologias aplicadas ao inventário florestal

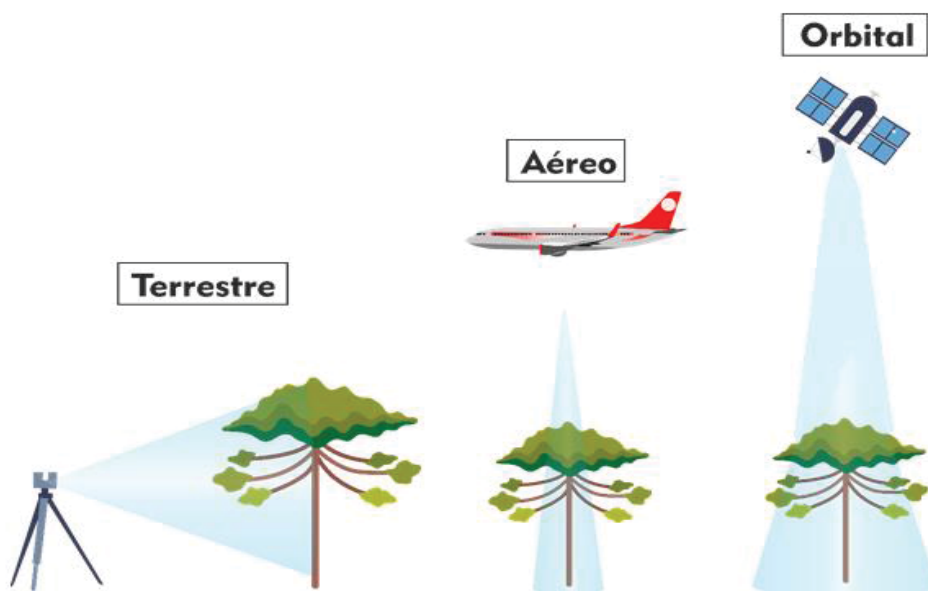
### 2.2.1 Tecnologia LiDAR

A tecnologia LiDAR baseia-se nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio

para localizar os objetos de interesse, o sistema LiDAR utiliza pulsos laser. Os sistemas de varredura a laser baseiam-se na detecção da variação de luz do laser, por meio de um equipamento de sensoriamento remoto ativo (scanner), que transmite a radiação eletromagnética e mede a radiação que é retro espelhada para um receptor depois de interagir com a atmosfera da Terra ou com objetos. O equipamento que realiza o escaneamento é chamado de Laser Scanner e pode ser do tipo móvel ou fixo, aerotransportado ou terrestre (BORDIN, 2015).

A tecnologia LiDAR pode apresentar-se de três tipos, sendo: orbital, aéreo (ALS – *Aerial Laser Scanning*), e terrestre (TLS - *Terrestrial Laser Scanning*). A principal diferença desses tipos de LiDAR está na plataforma que carrega o sensor laser, o princípio de funcionamento deles é bastante similar, sendo a emissão de um pulso de energia, e o cálculo de 34 distâncias a partir do tempo entre transmissão e recepção da energia de retorno (NIEUWENHUIS, 2010; HENTZ, 2018). A Figura 3 está representando os tipos de plataforma LiDAR aplicados ao setor florestal.

FIGURA 3 - TIPOS DE PLATAFORMA LIDAR APLICADOS AO SETOR FLORESTAL



FONTE: Elaborado pela autora

Galvanin e Poz (2012), consideram que existem dois tipos de sistemas de varredura a laser, os sistemas estáticos e os dinâmicos. Os sistemas estáticos apresentam dois sistemas de medida a laser: o princípio que se baseia no intervalo de tempo decorrido desde o instante da emissão do pulso até o instante do retorno do mesmo (distância) ao sistema e o princípio baseado na triangulação. Já o sistema dinâmico, no qual está baseado o sistema de varredura a laser aerotransportado, utiliza um feixe óptico de alta potência e bem direcionado, com coerência no espaço e no tempo, para garantir a qualidade da medição da distância. Para determinar a posição dos pontos no terreno, o sensor conta com apoio de um sistema de posicionamento global com precisão compatível, de modo que, cada ponto é determinado mediante um sistema de GPS diferencial (DGPS) e de um sistema de apoio inercial (IMU).

A mensurações de dados LiDAR a nível de árvores individuais pode ser realizada, desde que os pontos de laser sejam densos o suficiente para distinguir as copas das árvores. A recuperação de parâmetros de árvores para a avaliação da biomassa acima do solo (AGB) das complexas florestas tropicais usando a tecnologia LiDAR é um grande empreendimento e, ainda assim, requer muito conhecimento técnico (BAZEZEW et al., 2018).

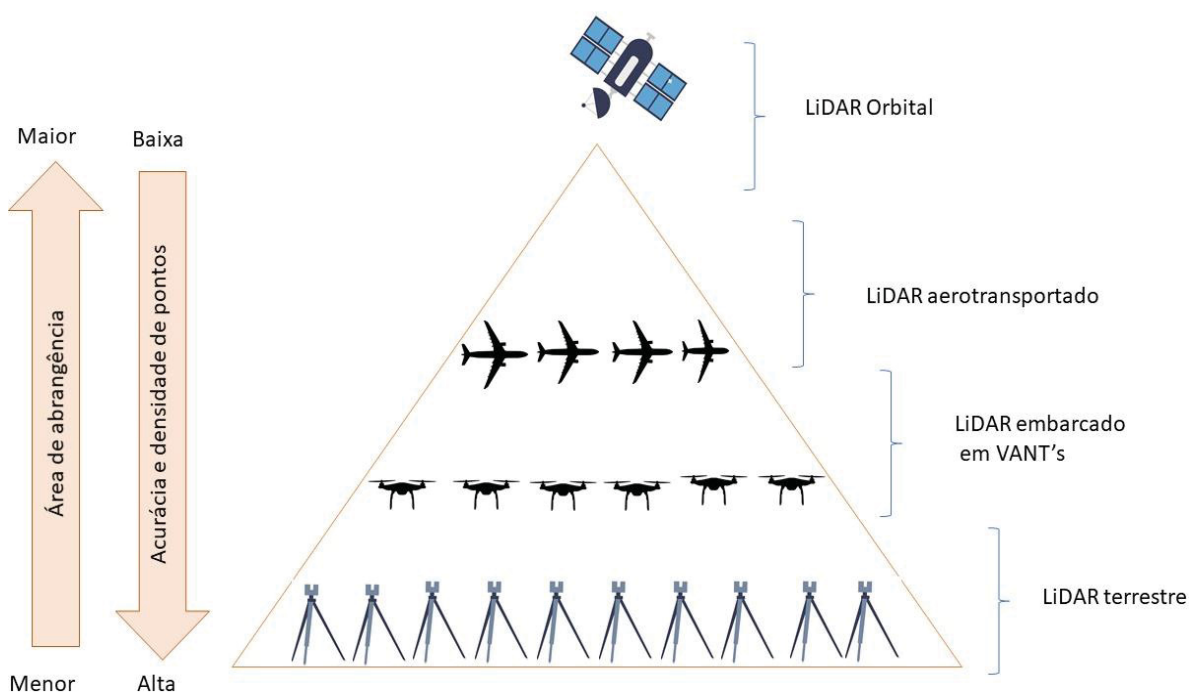
De acordo com Silva et al., (2018) os sistemas LiDAR para aplicações florestais são diferenciados com base no tipo de plataforma (por exemplo, terrestre, aéreo ou orbital), registro de sinal (retorno discreto ou FW), tamanho do *footprint* (por exemplo, pequeno, ou seja, <1 m ou grande, ou seja, 10 – 25 m de diâmetro) e padrão de varredura da amostra (perfilamento ou varredura).

Os laser scanners terrestres são capazes de produzir nuvens de pontos muito densas de árvores individuais, apresentando um alto nível de detalhamento e alta densidade de pontos, com detalhes acurados a nível de árvore individual, o qual são considerados difíceis de medir usando outras plataformas ou abordagens tradicionais de medição (PUTMAN et al., 2018). O LiDAR aerotransportado pode ser embarcado em aeronaves ou em veículos aéreos não tripulados (VANTs), de modo que, o desempenho dos sensores a laser é muito mais sensível aos efeitos climáticos e, ainda, apresentam uma menor densidade de pontos quando comparados com o TLS. O LiDAR orbital, como por exemplo o GEDI, apresenta uma maior área de imageamento do que



os demais lasers aplicados ao setor florestal, porém, a acurácia é menor, sendo integrado em modelos para estimativas de biomassa, ou para estimativas em nível global. Na Figura 4 é possível visualizar a representação da escala, abrangência e acurácia da tecnologia LiDAR em diferentes plataformas.

FIGURA 4 - ESCALA, ABRANGÊNCIA E ACURÁCIA DA TECNOLOGIA LIDAR EM DIFERENTES PLATAFORMAS



FONTE: Elaborado pela autora, adaptado de USGS (2019)

De acordo com Zandona (2006), a tecnologia LiDAR apresenta vantagens em relação à fotogrametria, sendo: I) Possibilita o mapeamento de florestas e áreas cobertas por vegetação: geração de modelos digitais do terreno (MDT), estratificação da vegetação, extração de parâmetros biofísicos, estimativas de volume e biomassa, quantificação de carbono; II) Mapeamento de corredores: rodovias, linhas de transmissão, erosão em zonas costeiras, mapeamento de recursos hídricos e de transportes; III) Geração de modelos digitais para regiões urbanas: determinação da altura de edificações, planejamento de antenas para telecomunicações; IV) Mapeamento de áreas inundáveis: modelos de propagação de cheias e enchentes, identificação de infraestruturas e áreas de



risco; V) Mapeamento de superfícies com baixa diferenciação de texturas (gelo, areia e neve).

#### 2.2.1.1 Laser scanner terrestre portátil

Segundo Campos et al. (2018) os sistemas móveis terrestres (*Personal Mobile Terrestrial System* - PMTS) tornaram-se mais populares com tecnologias emergentes, como sensores de navegação miniaturizados e câmeras *omnidirecionais* prontas para uso, que permitem abordagens de mapeamento móvel de baixo custo. No entanto, a maioria desses sensores não foi desenvolvida para fins métricos de alta precisão e, portanto, exige métodos rigorosos de aquisição e processamento de dados para obter resultados satisfatórios para alguns aplicativos de mapeamento.

A maneira como a coleta do laser scanner terrestre portátil é realizada está diretamente ligada ao objetivo das medições, mas no geral, o equipamento é carregado por um operador que se desloca ao longo da linha central da parcela ou transecto a uma velocidade constante, para obter a distribuição uniforme dos pulsos (PARKER et al., 2004; HARDIMAN et al., 2011, ALMEIDA et al., 2014). A linha central da parcela, dependendo da extensão, é dividida em segmentos para facilitar a mensuração e distribuição uniforme dos pulsos na parcela. Para cada segmento é feito um arquivo de dados, os arquivos contêm a distância vertical de cada barreira que interceptou os pulsos ao longo do perfil vertical da floresta (ROSA, 2014).

Liang et al. (2018), consideram que, o sistema móvel é de 3 a 10 vezes mais rápido que o TLS. Observações móveis em ambientes florestais ainda estão nos primeiros estágios de desenvolvimento, de modo que, os estudos referem-se principalmente sobre a demonstração do sistema em florestas com estruturas simples, porém, a qualidade dos dados de atributo de árvore derivados de sistemas móveis contemporâneos permanece incerta (RYDING et al., 2015; BAUWENS et al., 2016; OVELAND et al., 2017).

#### 2.2.1.2 Laser scanner Terrestre (TLS)

Os instrumentos TLS emitem um grande número de pulsos de laser, normalmente dezenas a centenas de milhares por segundo, na parte visível ou infravermelha próxima do espectro, que se propagam centenas de metros no espaço ao redor do instrumento. Se um pulso atinge um objeto, parte da energia é espalhada de volta para o sensor e dispara a gravação de sua distância e intensidade. Conhecendo a direção do pulso emitido, a posição em um espaço tridimensional é registrada. Esses locais tridimensionais podem ter precisão de alguns milímetros em centenas de metros, dependendo das propriedades do instrumento, e compreendem uma nuvem de pontos descrevendo a localização dos objetos no espaço tridimensional (MALHI et al., 2018).

A varredura laser scanner terrestre (TLS) surgiu como uma referência para medições tridimensionais da estrutura da floresta, bem como, para a reconstrução e modelagem de variáveis dendrométricas. Medições no campo podem ser complementadas por novos sensores de peso leve em veículos aéreos não tripulados (VANTs) e sensores terrestres portáteis. No entanto, pesquisas ainda buscam quanto do volume do dossel da floresta pode ser amostrado e como a oclusão é espacialmente distribuída (HUSAIN e VAISHYA et al., 2018).

O TLS é normalmente montado sobre um tripé ou plataforma estável, que explora, por meio do *laser*, os elementos do espaço circundante. Em geral, o equipamento se move horizontalmente no sentido horário deslocando-se em pequenos intervalos angulares. A cada intervalo angular (horizontal) o equipamento permanece estático, e por meio de um telescópio ou espelho giratório dispara o *laser* verticalmente em intervalos angulares determinados, calculando as coordenadas dos pontos que refletem o sinal (MARQUEZ, 2011, citado por BUCK et al., 2011).

O primeiro sistema TLS comercial foi construído por Cyra Technologies (adquirido pela Leica em 2001) em 1998, e os primeiros trabalhos relacionados com a estimativa de variáveis das árvores em inventários florestais foram relatados por volta do ano 2000 ( HOPKINSON et al., 2004 , PARKER et al., 2004 , THIES et al., 2004). A motivação inicial para o uso de TLS em inventários florestais foi melhorar a eficiência do trabalho nas parcelas de amostragem, ou

seja, substituir os atributos de árvore medidos manualmente pelos modelados automaticamente por meio do TLS.

De acordo com Liang et al., (2016) atualmente o TLS tem se mostrado capaz de determinar variáveis de árvores de alta qualidade que são importantes, mas não diretamente mensuráveis em inventários florestais convencionais, como: volume do fuste e componentes da biomassa (total, fuste e ramos), com níveis de precisão semelhante aos melhores modelos alométricos conhecidos (YU et al., 2013 ; KANKARE et al., 2013; LIANG et al., 2014; NEWNHAM et al., 2015). Logo, o TLS tem demonstrado a possibilidade de melhorar a qualidade e a quantidade dos dados de referência coletados nos inventários florestais.

Os mecanismos de varredura permitem que o TLS capture medidas muito densas (por exemplo, atualmente os equipamentos são capazes de registrar um milhão de pontos por segundo) em um curto período de tempo. Em um instrumento TLS, o scanner mede o ambiente ao redor usando uma rápida rotação vertical do espelho e uma rotação mais lenta do instrumento horizontal. Na direção vertical, o feixe de *laser* começa, por exemplo, a partir do zênite do scanner e gira para a posição de escaneamento mais baixa do plano horizontal do instrumento. Em seguida, o feixe de *laser* continua no zênite do scanner no outro lado do instrumento. Na direção horizontal, o scanner gira 180° e digitaliza os dois lados do instrumento simultaneamente.

De acordo com Torresan et al. (2018), para fins de inventário em parcelas de amostras circulares, os dados TLS são adquiridos seguindo três abordagens, sendo: varredura única (SS), varredura múltipla (MS) e varredura multiúnica (MSS). Na primeira abordagem, a varredura única (SS), o scanner a laser é posicionado no centro da parcela e as árvores são digitalizadas por apenas uma varredura completa do campo de visão. Na varredura múltipla (MS), o TLS é colocado em diferentes locais dentro e fora da parcela e uma varredura é realizada a partir de cada local. As nuvens de pontos geradas a partir das varreduras são então registradas por meio de alvos de referência artificiais. A terceira abordagem, a varredura multiúnica (MSS), é semelhante à varredura múltipla, mas sem alvos de referência artificial, de modo que, o registro é baseado em árvores detectadas. Entre as três abordagens, a abordagem de varredura única é a mais simples e rápida para aquisição de dados, mas a

oclusão de árvores por outras árvores, ramos e arbustos pode resultar na omissão de até 20% das árvores presentes na parcela (MENGESHA et al., 2015).

De acordo com Bauwens et al. (2016), MS produz os melhores resultados para descrever a parte superior do dossel em relação ao SS, enquanto que, de acordo com Liang e Hyypä (2013), a precisão da detecção de galhos é significativamente melhorada usando a abordagem MSS com relação à varredura única. A abordagem MS parece ser a abordagem mais precisa para o mapeamento de parcelas de amostras florestais, permitindo a cobertura total da superfície do tronco. Embora MS e MSS representem melhorias em relação à varredura única, há uma falta de estudos comparando a precisão relativa das duas abordagens, principalmente no que se refere aos diferentes tipos de florestas (TORRESAN et al., 2018).

Durante as duas últimas décadas, agências nacionais de mapeamento, empresas, universidades e organizações de pesquisa têm se esforçado muito para desenvolver métodos para estimar atributos de árvores usando o TLS. Porém, considera-se que ainda falta entendimento adequado sobre o desempenho do TLS (PFEIFER et al., 2017).

Em nível de árvores individuais, uma das variáveis mais importantes é o diâmetro à 1,30m de altura (dap), e as inferências que a partir desse valor são feitas quanto à forma do fuste, volume e aproveitamento para diversos fins dos elementos que constituem a parte aérea da árvore (LARANJA, 2016). Os dados TLS são capazes de modelar a árvore com grande nível de detalhamento, sendo possível estimar a altura pelo ponto mais alto, e os valores do diâmetro conforme a altura determinada pelo usuário. Essas estimativas podem ser geradas de forma manual, com uso de *softwares* específicos, ou com o uso de algoritmos de forma automatizada.

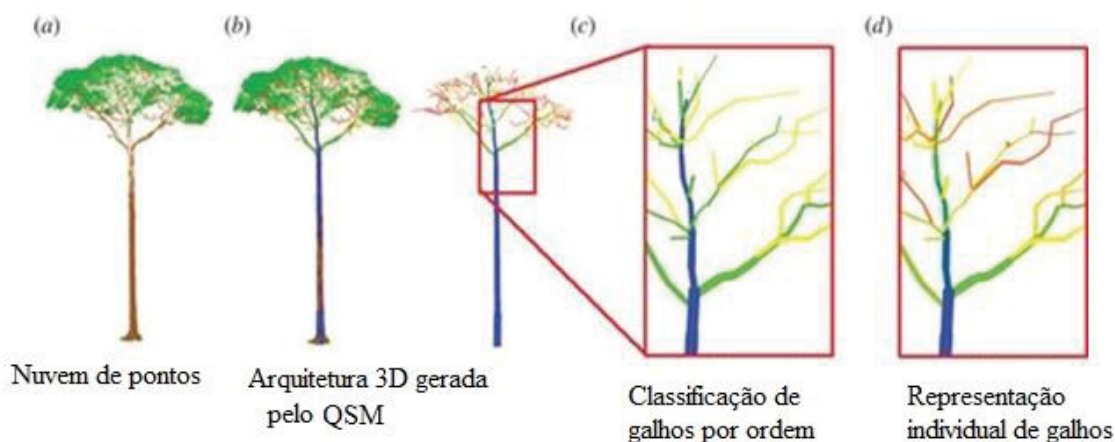
#### 2.1.1.3 *Quantitative Structure Models* (TreeQSM)

Os modelos de estrutura quantitativa (QSMs) evoluíram como um método rápido e preciso para extrair dados do fuste da árvore, incluindo a estrutura de

ramificação, permitindo construir modelos 3D detalhados e derivando biomassa ou características arquitetônicas da árvore (SCHNEIDER et al., 2019).

Malhi et al. (2018), consideram que a aplicação do TLS apresenta grande potencial para descrever a estrutura arquitetônica das árvores. Com base na Figura 5 é possível visualizar como essas variáveis da árvore são extraídas das nuvens de pontos. A nuvem de pontos da árvore é extraída das varreduras TLS (figura 5 a), depois que as folhas são filtradas. Um modelo de estrutura quantitativa (QSM) é montado na árvore para extrair a forma de árvore como uma combinação de múltiplos cilindros de comprimento e diâmetro variáveis (figura 5 b). A partir deste QSM, as dimensões dos ramos individuais podem ser calculadas. Ramificações dos modelos QSM originais são agrupadas por ordem de ramificação. Na figura 5 c, a haste principal não se divide quando um nó de ramificação aparece e continua ao longo do topo com o mesmo valor de ordem de ramificação. Para descrever uma arquitetura de ramificação mais detalhada, também é possível separar ramificações individuais em cada nó de ramificação e reatribuí-las a valores exclusivos (figura 5 d). A haste principal agora para no primeiro nó da ramificação e o valor exclusivo é atribuído toda vez que ocorre uma divisão.

FIGURA 5 - APLICAÇÃO DO TLS PARA EXTRAIR E DERIVAR ORDENS DE RAMIFICAÇÃO E PARÂMETROS DE ARQUITETURA DE ÁRVORE.



FONTE: Malhi et al. (2018)

#### 2.1.1.4 Principais pressupostos do método TreeQSM

O método de reconstrução TreeQSM é baseado em uma série de suposições básicas que devem ser preenchidas para garantir resultados confiáveis (RAUMONEN, 2012). Os pressupostos mais importantes são:

- a) A nuvem de pontos dada como entrada, deve ser somente referente à árvore individual. Exceto alguns pontos de terreno e sub-bosque que podem ser removidos pelo método no processo de filtragem do algoritmo. Além disso, muito ruído nos dados, pode ser considerado como medições verdadeiras, influenciando diretamente na qualidade do resultado obtido.
- b) Somente dados de coordenadas (x, y, z) da nuvem de pontos são necessários na reconstrução. Assim, não há necessidade de dados de intensidade, cor, etc. No entanto, os dados adicionais podem ser úteis para filtrar folhas e ruído, entre outros.
- c) Somente partes de árvores suficientemente cobertas podem ser reconstruídas com precisão. A árvore e seus detalhes devem ter número suficiente de pontos medidos para que os cilindros possam ser gerados com precisão. No entanto, ainda não existem estudos indicando a melhor resolução da nuvem de pontos, de modo que, não há uma regra geral que pode ser aplicada e os números podem variar caso a caso. Nuvens de pontos com alta resolução de digitalização ou com um grande número de varreduras, podem comprometer a precisão dos QSMs resultantes, tornando lento o processo de reconstrução dos cilindros.
- d) No caso dos galhos muito pequenos ou muito grandes, existem dois métodos básicos para controlar esses cilindros, que às vezes resultam em menos quadrados de encaixe devido a várias razões.
- e) O tronco deve ser claramente separado e visível próximo ao solo, porque o processo de segmentação começa a partir da base do tronco. Além disso, se os galhos mais baixos tocarem o solo, a reconstrução pode falhar.

Entretanto, não existe nenhuma suposição especial sobre espécies de árvores ou tamanho. Basicamente, os resultados dependem da qualidade dos dados da nuvem de pontos.

#### 2.1.1.5 Fontes de erro associadas à aplicação do TreeQSM

De acordo com Kroocks et al. (2014), as estimativas da precisão do algoritmo TreeQSM são difíceis de mensurar em árvores adultas, pois a obtenção de dados de referência precisos exige uma amostragem destrutiva (VELÁZQUEZ-MARTÍ et al., 2012). De modo que, as maiores fontes de erro são:

- Oclusões nos dados causadas pelo sombreamento
- Movimento das árvores durante o scaneamento
- Ruído de medição e erro
- Regiões com densidade de pontos baixa
- Ramos e galhos não circulares
- Material não madeirável causando imprecisão na medição do tamanho do ramo (geralmente tornando os cilindros muito grandes)
- Erros de registro, quando a fonte de erro é maior do que o aceitável
- Erros no processo de modelagem

#### 2.2.1.6 Laser scanner aéreo (ALS)

A tecnologia ALS em áreas florestais foi aplicado na medição de alturas já na década de 1980, o Serviço Florestal Canadense demonstrou tal aplicabilidade para estimar alturas, diâmetro de copa e densidade de cobertura vegetal, e ainda, modelo digital do terreno (LIM et al., 2003; GONÇALVES, 2012; NETO, 2014).

Quando usada para mapear a estrutura tridimensional de extensas superfícies, a partir de uma perspectiva distante e acima do solo, como por exemplo a bordo de uma aeronave, é comum que essa técnica seja referenciada com as iniciais ALS que está relacionada ao termo *Aerial Laser Scanning* ou laser scanner aéreo (GORGENS, 2014).

O uso do ALS em estudos florestais tem aumentado na última década, de modo que, existe um número significativo de pesquisadores que têm utilizado



essa tecnologia para prever características diretamente mensuráveis do dossel, bem como altura da árvore, índice de área foliar, e demais métricas como área basal, biomassa, inventário de carbono (JAKUBOWSKI et al., 2013).

Diversos estudos têm indicado que as variáveis florestais como altura média, área basal e volume, podem ser mensuradas com boa precisão por meio da tecnologia ALS e em função disso, essa técnica já vem sendo utilizada operacionalmente em inventários florestais. Com relação às características gerais dos talhões, tais como volume e área basal total, as estimativas apresentam resultados melhores do que os obtidos nos inventários convencionais em campo (NAESSET, 2004; ZONETTE et al., 2010).

#### 2.2.1.7 LiDAR embarcado em VANTs

Recentemente, melhorias na tecnologia de pequena escala permitiram o uso de aeronaves remotamente pilotadas como uma plataforma alternativa de sensoriamento remoto, oferecendo uma combinação distinta de captura de dados de alta resolução a um custo significativamente menor. A pesquisa atual sobre o uso de VANTs (Veículos Aéreos não tripulados) como uma plataforma de captura de dados em 3D, inclui levantamentos arqueológicos e monitoramento de vegetação, por exemplo. Esses estudos utilizam técnicas de imagens e fotogrametria, que permitem gerar nuvens de pontos de alta densidade a partir das imagens de alta resolução coletadas pelos VANTs (WALLACE et al., 2012).

Alguns estudos como Dandois e Ellis (2015), apresentam as vantagens de nuvens de pontos de densidades significativamente maiores em comparação àquelas comumente coletadas com plataformas LiDAR em escala real. A desvantagem das nuvens de pontos geradas por meio de VANTs é que, poucos pontos são medidos a partir do interior da copa e da superfície subjacente em áreas densamente vegetadas. Isso dentro das informações sobre o dossel é vital para muitas das técnicas desenvolvidas para derivar métricas a nível de árvore, como por exemplo, no que se refere a biomassa acima do solo.

Jaakkola et al. (2010), apresentaram um estudo sobre potencial de LiDAR transmitido por VANTs para uso na pesquisa florestal. Com a implementação de



um veículo aéreo não tripulado de asa de rotor equipado com vários sensores de navegação, em combinação com dois sensores LiDAR integrados, foram produzidos conjuntos de dados de alta resolução, oferecendo melhor mapeamento individual em nível de árvore. Em função da densidade aprimorada de uma nuvem de pontos LiDAR embarcado em VANTs, várias métricas podem ser medidas em uma escala mais fina e com maior precisão quando comparadas às plataformas LiDAR tradicionais. Devido à sua alta resolução espacial e temporal, juntamente com baixos custos operacionais, tais dados podem fornecer uma abordagem mais direcionada ao monitoramento de florestas e permitir o uso de pesquisas multitemporais, como fitossanidade florestal e o monitoramento de clareiras. Estudos como esses sugerem que, por meio da combinação de captura de dados de alta resolução e baixo custo, as plataformas de VANTs provavelmente serão a próxima ferramenta a ser escolhida para otimizar pesquisas detalhadas em pequenas áreas florestais.

#### 2.2.1.8 Laser scanner orbital - GEDI

O *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) é o primeiro laser de alta resolução que abrange observações da estrutura 3D da Terra, faz medições precisas da altura do dossel da floresta, estrutura vertical do dossel e elevação da superfície. O GEDI melhora radicalmente a capacidade de caracterizar importantes processos de carbono e água, biodiversidade e habitat. Esse sistema foi implantado na Estação Espacial Internacional (ISS) em 2018 para uma missão de dois anos (GEDI, 2019).

De acordo com Qi et al. (2019), durante sua missão nominal de dois anos, o GEDI fornecerá cerca de 15 bilhões de medições de elevação vertical e estrutura vertical da floresta com uma resolução de 25 metros. Auxiliado por essas observações do GEDI, os dados do TDX podem fornecer mapas de altura de floresta de parede a ponta, que por sua vez podem ser usados para estender as observações do GEDI para a estrutura da floresta e estimativas de biomassa com resolução, precisão e cobertura mais refinadas (Qi e Dubayah, 2016).

Os algoritmos de base teórica (ATBDs) descrevem as teorias físicas, os procedimentos matemáticos e os pressupostos de modelo aplicados no cálculo das grandezas geofísicas das medições de altimetria a laser *recebidas* pelo GEDI. Esses documentos fornecem dados necessários para os usuários entenderem e usarem os produtos de dados GEDI. Cada ATBD corresponde a um ou mais produtos de dados e podem ser visualizados na tabela 1.

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DE CADA ATBD DO GEDI

<b>ATBD</b>	<b>Caracterização</b>	<b>Produtos de dados</b>	<b>Resolução</b>
<b>L1A-2A</b>	Transmitir e Receber Interpretação e Geração de Forma de Onda de Produtos L1A e L2A	1A: formas de onda brutas 2A: métricas de elevação do solo, altura máxima do dossel, altura relativa (RH)	25m
<b>L1B</b>	Waveforms geolocalizadas	Formas de onda geolocalizadas	25m
<b>L2B</b>	Footprint Cobertura do dossel e métricas de perfil vertical	Fração de Cobertura do Dossel (CCF), perfil CCF, Índice de Área Foliar (LAI), perfil LAI	25m
<b>L3</b>	Métricas da superfície da terra em grade	Métricas de nível 2 em grade	25m
<b>L4A</b>	Footprint biomassa acima do solo	Nível de pegada acima da biomassa do solo	25m
<b>L4B</b>	Produto de biomassa em grade	Densidade de Biomassa Acima do Solo (AGBD)	1km

FONTE: NASA (2019)

### 2.2.1.9 ICESat - 2

De acordo com a NASA (2019), o ICESat-2 é um satélite de elevação de gelo que foi lançado em setembro de 2018, o satélite carrega um altímetro a laser de contagem de fótons que permite a medição das camadas de gelo e da criosfera. A missão possibilitará realizar a medição de altura das regiões temperadas e tropicais da Terra, sendo capaz de realizar um levantamento da vegetação e de florestas em todo o mundo.

O ICESat-2 fornecerá aos cientistas medições de altura que criam um retrato global tridimensional da Terra, reunindo dados que podem rastrear precisamente as mudanças de terreno, incluindo geleiras, gelo marinho, florestas e muito mais. Embora muitas das descobertas do ICESat-2 ainda não tenham sido imaginadas, a missão dos satélites tem quatro objetivos científicos, conforme a NASA (2019), sendo:

- Mensurar gelo derretendo e investigar como isso afeta o aumento do nível do mar
- Medir e investigar mudanças nas geleiras e glaciares
- Mensurar a altura da vegetação em florestas e outros ecossistemas em todo o mundo

Considera-se que, o ICESat-2 pode ser uma ferramenta para uso de estimativas da vegetação em uma escala global.

#### 2.2.1.10 Integração entre ALS e TLS

Em função da estrutura biofísica complexa das florestas tropicais, o uso integrador de ALS e TLS oferece a possibilidade de detectar árvores sob diferentes condições de dossel para medições de parâmetros de árvores mais precisas. ALS e TLS foram combinados para estimar a estrutura da copa da floresta ao nível da parcela (HILKER et al., 2010).

Um dos poucos estudos em que ALS e TLS estão integrados em um nível de árvore é o de Lindberg et al. (2012), que descobriram que cerca de um terço das árvores detectadas a partir de TLS poderiam possivelmente se ligar a árvores detectadas por ALS. O uso integrativo de dados de ALS e TLS requer o correto registro das fontes de dados. Árvores identificadas a partir de dados de ALS foram então conectadas a copa de árvore detectadas por TLS para estimativas de diâmetro a 1,30 m de altura. Para vincular árvores detectadas de dados ALS e TLS com as árvores correspondentes no campo, os atributos de posição de árvore, rotulação de árvore e área de copa medidos no campo são necessários, pois as posições de GPS das árvores medidas sob camadas de dossel são menos precisas (BAZEZEW et al., 2018).

## 2.6 Veículos aéreos não tripulados (VANTs)

Durante a última década, as plataformas de veículos aéreos não tripulados têm sido utilizadas para várias finalidades, apresentando evoluções significativas nos sistemas de comunicação, sistemas de piloto automático,

sistemas geoespaciais de navegação global por satélite (GPS/ GNSS). O grande potencial do sistema está relacionado à possibilidade de realizar várias aplicações de mapeamento. Além disso, utilizar VANTs para obter dados espaciais é altamente vantajoso para os usuários em termos de tempo, custo e precisão dos dados (ZEIBEK e SANHOGLU, 2019).

O uso de VANTs tem aumentado em estudos de ecossistemas, bem como a identificação de espécies de plantas, altura do dossel, localização do fuste, biomassa acima do solo (AGB) e estrutura do dossel (OTERO et.al, 2018). A tecnologia tem potencial de fornecer uma quantidade maior de informações espaciais sobre os atributos biofísicos da floresta, pois permite levantamentos mais rápidos de áreas maiores em comparação com levantamentos mais tradicionais baseados em solo, podendo complementar ou até substituir parcialmente as técnicas tradicionais de inventário florestal (DANDOIS e ELLIS, 2013; ZHANG et al., 2016; OTERO et al., 2018).

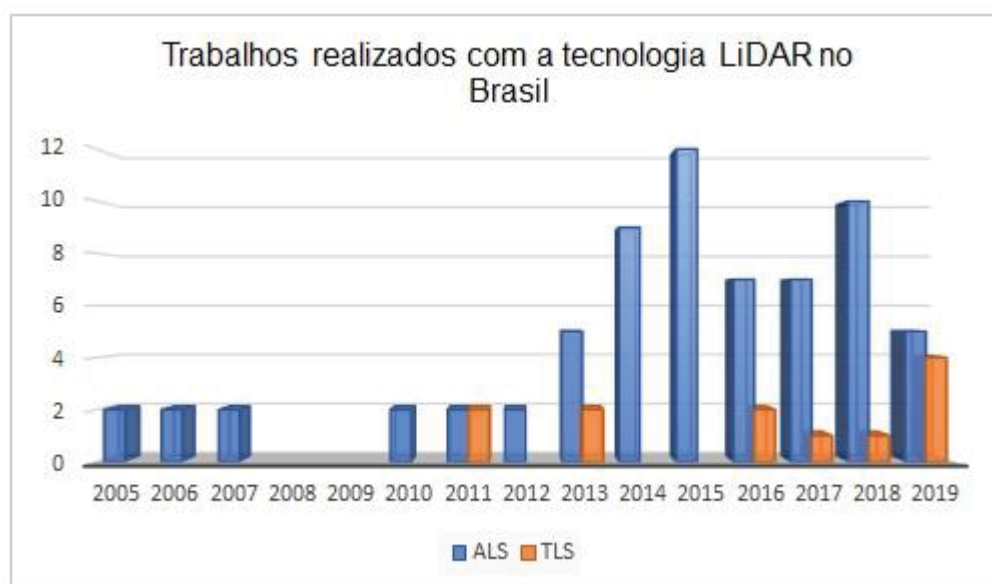
O uso de dados tridimensionais baseados em imagens de VANT tem se mostrado eficaz para os inventários florestais. No entanto, as limitações no alcance das operações, impedem seu uso em aplicações de grande escala. O uso de dados com cobertura parcial em combinação com gráficos de campo pode aumentar a precisão das estimativas baseadas em campo dos parâmetros de recursos florestais e pode oferecer uma alternativa econômica para a aquisição de dados (PULITI et al., 2017).

### 2.3 Cenário atual de pesquisas utilizando a tecnologia LiDAR aplicado ao setor florestal no Brasil

No intuito de apresentar um panorama geral das pesquisas utilizando LiDAR no Brasil, foi realizada um levantamento nas bases de dados: Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de nível superior (CAPES), Google Scholar, Web of Science e Science Direct, considerando artigos científicos, teses e dissertações, monografias e trabalhos em eventos de reconhecimento internacional.

Foram encontrados 70 trabalhos acadêmicos utilizando a tecnologia LiDAR desenvolvidos no Brasil. Sendo um total de 59 trabalhos utilizando ALS, confirmando que a técnica de processamento apresenta alguns avanços significativos, tanto em florestas nativas quanto plantadas. Os estudos utilizando a tecnologia TLS foram apenas 11. O primeiro estudo utilizando ALS no Brasil foi no ano de 2005, e com o TLS foi em 2011, na Figura 6 está destacada a evolução dos estudos utilizando LiDAR para o setor florestal.

FIGURA 6 - EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM LiDAR NO BRASIL



FONTE: Elaborado pela autora

O maior pico de estudos realizados foi no ano de 2015, sendo todos realizados com o ALS, porém, a partir do ano seguinte os estudos utilizando TLS passaram a ser mais explorados, tendo um aumento no ano de 2019, devido aos avanços no TLS portátil. O TLS portátil tem se tornado uma realidade na pesquisa brasileira, apesar de ainda terem sido publicados poucos trabalhos na literatura, já se tem conhecimento do desenvolvimento de um sistema TLS móvel de baixo custo elaborado na tese de doutorado de Campos (2019). A pesquisa da autora propõe uma nova técnica para aquisição e processamento de dados obtidos com um sistema de mapeamento móvel terrestre leve e de baixo custo

embarcado em mochila, conhecido como PMTS (*Personal Mobile Terrestrial System* - Sistema de Mapeamento Móvel Pessoal). O sistema de mapeamento móvel proposto é composto por uma câmara *omnidirecional* (imagens *fisheye*) e um sistema de navegação GPS/IMU (*Global Positioning Systems/ Inertial Measurement Unit System*).

Embora em 2019 os estudos utilizando LiDAR no Brasil não tenham apresentado o seu maior pico, ocorreu um aumento na aplicabilidade da tecnologia TLS e estudos aplicados em uma maior área de abrangência, não somente a níveis locais.

O desenvolvimento da tecnologia TLS era considerado tradicionalmente atrasado em relação à varredura ALS, fator que pode estar relacionado ao alto custo dos sistemas TLS em relação aos equipamentos de levantamento tradicionais, como estações totais e receptores GNSS (TELLING et al., 2017)

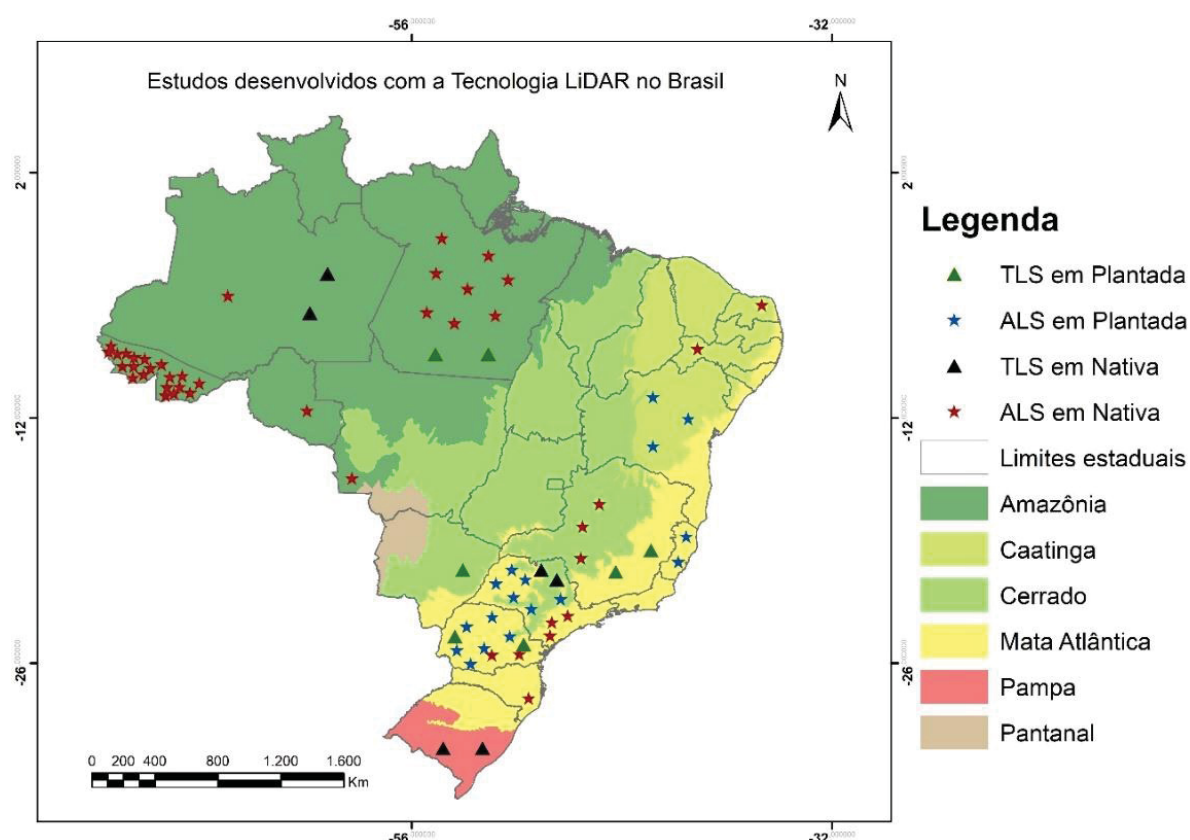
O *hardware* TLS teve uma melhoria significativa nos últimos anos, de modo que, o preço, o tamanho e o peso dos scanners a laser diminuíram, com a resolução espacial constantemente aumentada e a velocidade de medição. Logo, a redução dos custos e o aumento dos níveis de desempenho estão contribuindo para a adoção da tecnologia TLS na comunidade de ciências da Terra (PETRIE e TOTH, 2008; LIANG et al., 2016).

Silva (2013), considera que os avanços na tecnologia LiDAR tem ocorrido principalmente em florestas plantadas, com destaque na obtenção de informações referentes a árvores individuais. No período de 2013, o autor já considerava que as pesquisas iriam evoluir buscando ampliar a aplicação para o nível de parcelas em florestas plantadas e naturais, sendo essa última considerada um grande desafio em função da grande variedade de espécies e condições de sub bosque e dossel existentes.

No Brasil esse cenário tem se mostrado um pouco diferente, considerando que no levantamento foram encontrados 47 trabalhos desenvolvidos em florestas nativas e 23 em florestas plantadas, tal fato refere-se à disponibilidade da base de dados do Projeto Embrapa Paisagens Sustentáveis, que disponibiliza dados ALS para a Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica. O projeto foi criado no intuito de desenvolver novas metodologias e técnicas de contabilização de

carbono no âmbito do REDD+, disponibilizando um acervo de dados de levantamentos ALS no Brasil, por meio da plataforma WebGIS (EMBRAPA, 2014). Na Figura 7 é possível visualizar a distribuição dos estudos utilizando LiDAR no Brasil, sendo classificado como floresta nativa ou plantada, ou TLS e ALS.

FIGURA 7- ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM LIDAR NO BRASIL



FONTE: Elaborado pela autora

Na tabela 2 está apresenta um resumo do número de trabalhos desenvolvidos em cada setor, sendo classificados em tipo de floresta, e tipo de levantamento realizado.

TABELA 2 - ESTUDOS REALIZADOS NO BRASIL UTILIZANDO A TECNOLOGIA LIDAR

Tipo de Floresta	TLS	TLS portátil	ALS	ALS em VANT	Total
Nativa	2	3	39	3	47
Plantada	5	1	16	1	23
Total	7	4	55	4	70

FONTE: Elaborado pela autora

Papa et al. (2019), utilizaram um LiDAR embarcado em Vant para avaliar a estrutura de plantações de restaurações florestais, e distinguir os resultados de diferentes estratégias silviculturais. Foram analisados dados de altura do dossel, fração de gap e índice de área foliar, sendo por meio do LiDAR em VANT e com dados de inventário florestal convencional. Nesse estudo, a biomassa acima do solo foi fortemente correlacionada com a altura do dossel, possibilitando a elaboração de uma equação preditiva para monitorar características estruturais em outras áreas de restauração florestal na região Amazônica. Assim como o TLS portátil, o ALS embarcado em VANT já é considerado uma realidade na pesquisa brasileira, embora ainda sejam poucos estudos desenvolvidos.

Os estados do Paraná e São Paulo apresentam o maior número de pesquisas aplicadas em plantios florestais, sendo desenvolvidos tanto em áreas comerciais, como por exemplo o estudo desenvolvido por Silva et al. (2017), realizado nas plantações de *Pinus taeda* da empresa Klabin, localizado no município de Telêmaco Borba – PR, como estudos desenvolvidos em setores públicos, como o desenvolvido por Ruza (2019), aplicado na Fazenda Experimental Canguiri da UFPR, localizado em Curitiba – PR.

Embora não tenham sido encontrados trabalhos publicados, o GEDI também está sendo incluído na pesquisa brasileira, de modo que estão sendo desenvolvidos alguns estudos para mapear as cargas de combustível superficial e de copa perante simulação e propagação do fogo no bioma Cerrado.

Diante desses avanços na tecnologia LiDAR, acredita-se que o Brasil irá apresentar um aumento em pesquisas utilizando essa tecnologia, dada a vasta área florestal do País. Além disso, as empresas privadas têm procurado investir mais nesse setor de tecnologias remotas, visando uma menor demanda de pessoal em trabalhos de campo e obtenção de resultados mais rápidos e acurados.



### 3. CAPÍTULO II: Aspectos operacionais desenvolvidos na coleta de dados utilizando LiDAR e Inventário Florestal Convencional em Floresta Ombrófila Mista

#### RESUMO

A tecnologia LiDAR tem sido amplamente utilizada em florestas plantadas e em países desenvolvidos como Estados Unidos e Canadá, o qual possuem uma estrutura florestal natural diferente do Brasil devido a menor densidade de indivíduos. No Brasil, a aplicação dessa tecnologia em florestas nativas ainda é incipiente, principalmente ao que se refere ao *laser scanner* terrestre (TLS). Diante disso, o objetivo deste capítulo foi apresentar os aspectos operacionais desenvolvidos na coleta de dados para o desenvolvimento desta pesquisa e, ainda, sugerir o desenvolvimento de protocolo de uso do TLS para Floresta Ombrófila Mista. Foram utilizados três tipos de dados, sendo o *laser scanner* aéreo (ALS), *laser scanner* terrestre (TLS) e inventário florestal convencional (IFC). Os dados ALS foram provenientes de um aerolevantamento realizado no ano de 2012, apresentando quatro pontos por m<sup>2</sup>. Os dados TLS foram obtidos por meio de cinco parcelas e 10 árvores individuais, de modo que foram realizados alguns testes quanto ao tamanho e a formato da parcela. Optou-se por alocar parcelas circulares com 10 m de raio, além múltiplas varreduras, considerando a menor taxa de oclusão por parcela. Foi realizado o registro da nuvem de pontos, de modo que, para um resultado satisfatório foi necessário o mínimo de quatro alvos entre as varreduras, com resíduo admissível da união das nuvens de pontos menor que 0,01 m. O registro foi realizado no *software* SCENE FARO. Além disso, todas as esferas utilizadas no registro foram cobertas com papel colorido, em que a circunferência a 1,3 m (cap) foi demarcada com fita refletiva. Quanto ao inventário florestal convencional, realizou-se a mensuração do dap, altura e cubagem da árvore em pé utilizando o Criterion RD 1000. O planejamento e execução da coleta de dados é uma etapa importante, considerando que a qualidade do produto final está diretamente relacionada a obtenção e processamento dos dados.

Palavras-chave: *Laser scanner* aéreo; *Laser scanner* terrestre, Inventário florestal, Cubagem de árvore em pé.

## **CHAPTER II: Operational aspects developed in data collection using LiDAR Technology and Conventional Forest Inventory in Mixed Ombrophilous Forest**

### **ABSTRACT**

LiDAR technology has been used in planted forests and in developed countries such as the United States and Canada, which have a different natural forest structure than Brazil due to the lower density of individuals. In Brazil, the application of this technology in native forests is still very incipient, especially with regard to the terrestrial laser scanner (TLS). Therefore, the objective of this chapter was to present the operational aspects developed in the data collection for the development of this research, and also to suggest the development of a protocol for the use of the TLS for Mixed Ombrophilous Forest. Three types of data were used, being the aerial laser scanner (LAS), terrestrial laser scanner (TLS) and conventional forest inventory (IFC). LAS data were obtained from an aerial survey carried out in 2012, with 4 m<sup>2</sup> points, obtained through the CNPq project. TLS data were obtained by means of 5 plots and 10 individual trees, so that some tests were carried out regarding the size and shape of the plot, and it was decided to perform circular plots with a 10 m radius, in addition, for forests native and with high forest density it is recommended to use multiple scans, considering the lowest occlusion rate per plot. The registration of the point cloud was performed, which is a determining process in the pre-processing of the data, so that, for a satisfactory result, a minimum of 4 targets between the scans is required and the allowable residue of the union of the point clouds must be less than 0.010 meters (1cm). The registration was performed in the scene faro software, which is made available by the laser scanner manufacturer. In addition, all spheres used in the registration were covered with colored paper, and the cap was marked with reflective tape. As for the conventional forest inventory, the dbh, height and the standing tree were measured using the Criterion RD 1000. The planning and execution of data collection is an important step, considering that the quality of the final product is directly related obtaining and processing the data.

**Keywords:** Aerial Laser Scanner (LAS); Terrestrial Laser Scanner (TLS), Forest Inventory, Stem measure non destructive

### 3.1 Introdução

A combinação de dados de inventário florestal convencional e informações de sensoriamento remoto de conjuntos de dados *Light Detection and Ranging* (LiDAR) por meio de modelos estatísticos pode ser uma ferramenta funcional para prever e mapear biomassa acima do solo (AGB) (BABCOCK et al., 2016). Logo, há um interesse contínuo e crescente na aquisição de conjunto de dados para inventário florestal, pois eles são capazes de calibrar informações necessárias para o mapeamento de modelos de AGB em larga escala (HEALEY et al., 2012; BABCOCK et al., 2016).

Os *scanners* terrestres disponíveis no mercado não são específicos para uso em florestas, no entanto, esses instrumentos de uso comercial têm sido utilizados com sucesso para medir a estrutura da floresta em grande detalhe (NEWNHAM et al., 2012; WILKES et al., 2017). As técnicas atuais para estimar a biomassa a partir de *laser scanner* terrestre (TLS) variam consideravelmente em eficácia, porém não são aplicáveis em todas as formas de crescimento de árvores e poucas são validadas com medidas destrutivas. O desempenho de muitos métodos baseia-se em dados de baixo ruído, o que pode ser considerado um obstáculo significativo para a extração automatizada de volume em florestas com grande densidade de indivíduos (HACKENBERG et al., 2015; STOVALL et al., 2017).

Há várias questões a serem consideradas quando pretende-se executar o levantamento de dados, muitas das quais são comuns a todos os trabalhos de campo, porém, outras em específico quando se trabalha com dados de sensoriamento remoto em florestas heterogêneas com alta densidade de indivíduos. O tipo de floresta, o sistema de amostragem, as especificações do scanner, as configurações do instrumento, o objetivo e a escala do produto final devem ser considerados ao realizar o planejamento do inventário florestal (WILKES et al., 2017).

Laurin et al. (2016), consideram que a acurácia com pesquisas LiDAR é bastante variável, estando relacionada a diferentes estruturas florestais, tamanho de parcela e classes de dap, sendo que florestas tropicais são caracterizadas por precisões menores do que aquelas de outros biomas.

No que se refere a aplicabilidade do TLS em florestas nativas do Brasil, a literatura apresenta poucos estudos aplicados na Amazônia e nenhum aplicado ao bioma Mata Atlântica. Portanto, este capítulo apresenta um detalhamento da metodologia empregada, visando apresentar as principais problemáticas encontradas durante o levantamento de dados e, ainda, sugerir possíveis alternativas para futuros estudos.

### 3.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste capítulo foi apresentar os aspectos operacionais desenvolvidos na coleta de dados para inventário florestal convencional e inventário florestal com a tecnologia LiDAR ALS e TLS para a Floresta Ombrófila Mista.

### 3.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os métodos de coleta de dados LiDAR (ALS e TLS) e inventário florestal convencional
- Apresentar um protocolo para coleta de dados em Floresta Ombrófila Mista

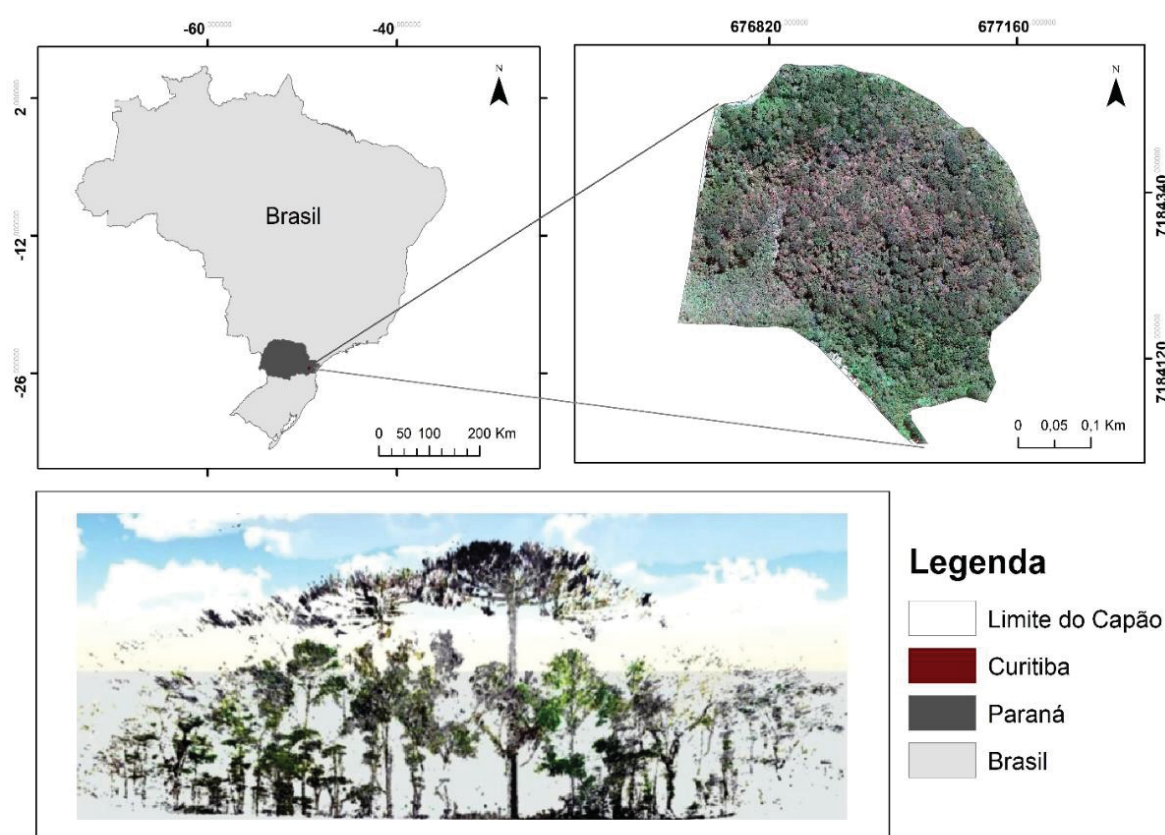
## 3.2 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um Fragmento de 15,24 ha de Floresta Ombrófila Mista urbano denominado “Capão do Tigre”, situado no campus III da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no município de Curitiba-PR. De acordo com Machado et al. (2008), a área de estudo sofreu ação antrópica com extração de indivíduos, e por consequência caracteriza-se hoje como uma floresta secundária com grande intensidade de espécies pioneiras e diâmetros de pequenas dimensões. Considera-se que apesar da floresta ter sido bastante antropizada no passado, a área vem sendo protegido desde 1980, época em que a UFPR adquiriu a área do Instituto Nacional de Seguro Social (INSS). Possui

um total de 349 indivíduos de *Araucaria angustifolia* com aproximadamente 100 anos, perfazendo uma média de 26,85 árvores de Araucária por hectare.

O clima predominante, segundo Kopp  n,    do tipo Cfb: subtropical úmido mesotérmico. Rondon Neto et al. (2002), identificaram nessa área a existência de Solos Hidromórficos próximos aos canais de drenagem e de Cambissolos Podzólicos nas regiões mais drenadas. Na Figura 8 está apresentado o mapa de localiza  o da área de estudo.

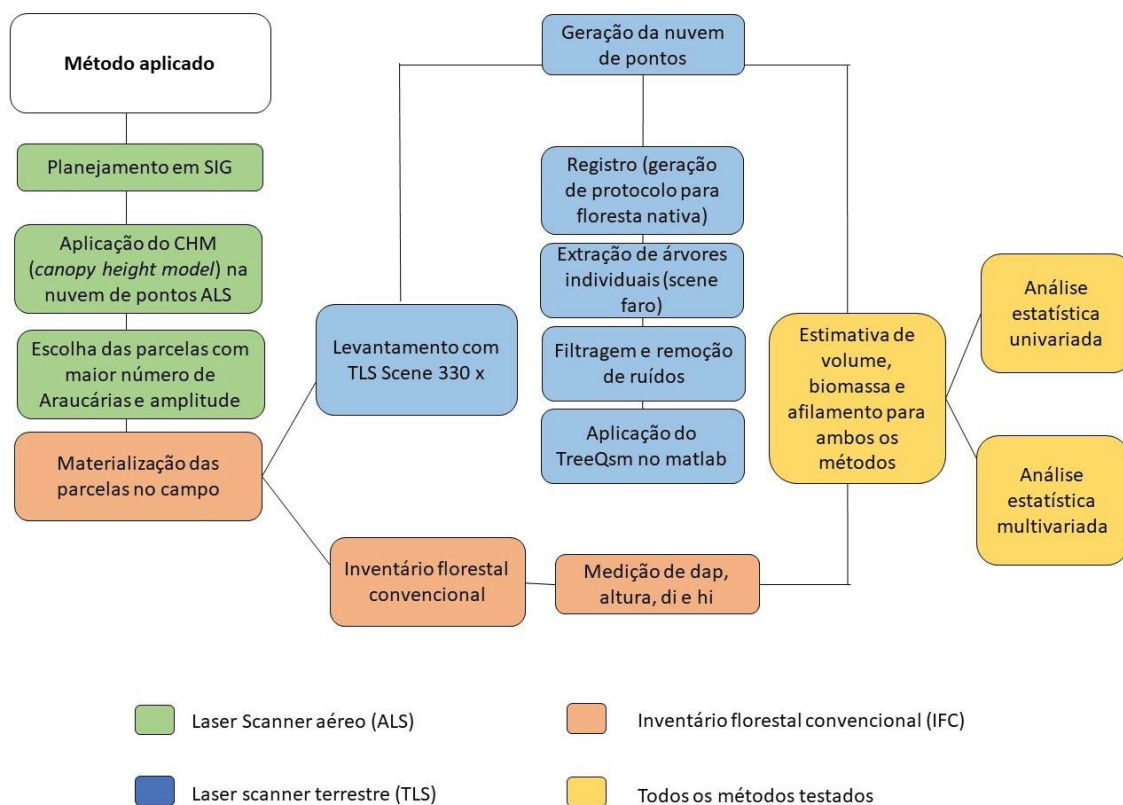
FIGURA 8 - LOCALIZA  O DA ÁREA DE ESTUDO E REPRESENTA  O VERTICAL DA FLORESTA



FONTE: Elaborado pela autora

Em síntese, o procedimento metodológico está apresentado na Figura 9, relacionando as principais etapas desenvolvidas.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA REALIZADA



FONTE: Elaborado pela autora

### 3.3 Obtenção de dados com o Laser scanner aéreo (ALS)

Os dados ALS foram obtidos no ano de 2012, juntamente com uma imagem aérea ortorretificada de alta resolução. As principais características dos dados coletados estão apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA NUVEM DE PONTOS ALS

Especificações técnicas	
Densidade média de pontos	4 pontos m <sup>2</sup>
Precisão altimétrica	~10 cm
GSD da ortoimagem	18 cm
Escala	1:2.000

FONTE: UFPR, 2012

Antecedendo o processamento básico da nuvem, realizou-se a organização dos dados LiDAR e a preparação do ambiente M-DOS no sistema *Windows*. O processamento foi dividido em duas etapas: processamento básico da nuvem ALS e processamento digital dos modelos.

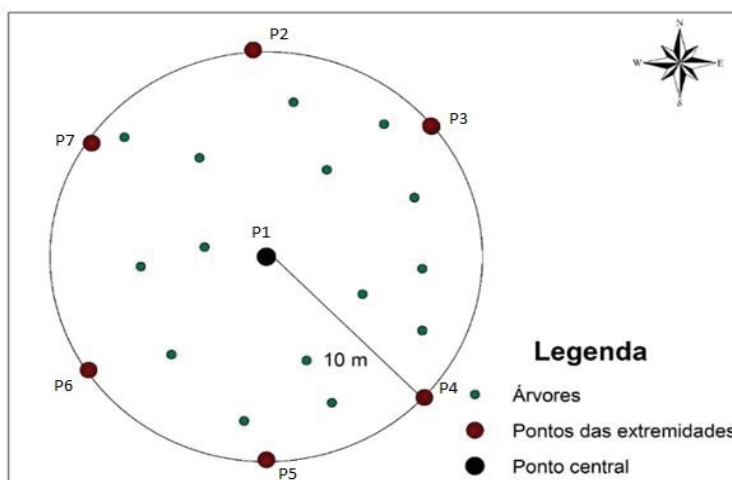
### 3.4 Inventário Florestal convencional

#### 3.4.1 Definição prévia das parcelas em ambiente SIG

Inicialmente realizou-se um levantamento bibliográfico acerca da melhor forma e tipo de parcela para levantamento com o TLS, tendo em vista que para estudos a nível de parcela, ou quando o objetivo é a obtenção de dados de muitas árvores, é importante por motivos de tempo de processamento, que a identificação das árvores existentes na cena seja realizada de forma automática (ASCHOFF e SPIECKER, 2004).

Avaliando as distâncias de varredura para a identificação automática de árvores, Liang et al. (2008), determinaram que na distância de até 10 metros do scanner todas as árvores foram identificadas corretamente pelo método automatizado. Wilkes et al. (2017), realizaram 27 estudos no período de 5 anos em florestas tropicais e temperadas, e concluíram que a grade de 10 m é recomendada para melhor detalhamento da estrutura do dossel florestal. Em função disso, foram estabelecidas parcelas circulares, com um raio de 10 m, conforme pode ser visualizado na Figura 10.

FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DAS PARCELAS IMPLANTADAS



FONTE: Elaborado pela autora

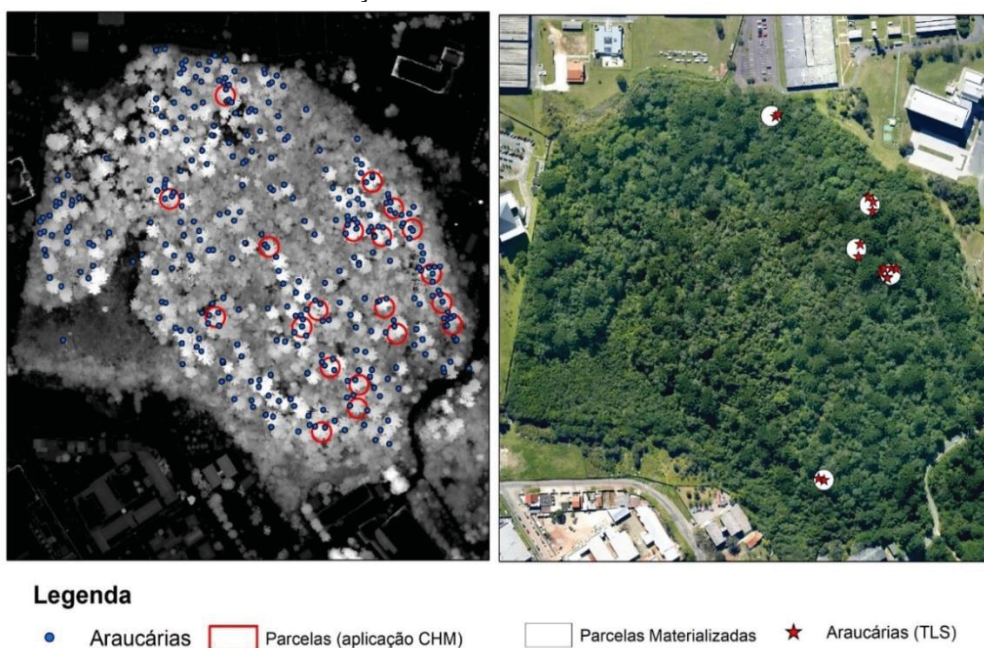


Foram pré-definidas 20 parcelas em ambiente SIG, onde foi tomada a coordenada do ponto principal, e dos demais pontos das extremidades. A partir do levantamento ALS foi gerado o *Canopy Height model* (CHM) implementado com base no algoritmo de segmentação multiresolução de crescimento regional do ALS-CHM.

O algoritmo requer as variáveis de controle de fornecimento do usuário, que controlam a qualidade do resultado da segmentação (ESPINDOLA et al., 2006). A segmentação foi realizada no *software eCognition*, de modo que, os critérios de homogeneidade foram determinados com base no parâmetro de escala, forma e compacidade, como afirmado por Carleer et al., (2005).

Diante disso, foram escolhidas 5 parcelas onde foi realizado o levantamento com o TLS, que podem ser visualizadas na Figura 11. Na representação da esquerda estão apresentadas as 20 parcelas pré-estabelecidas utilizando o CHM e todas as Araucárias existentes na área de estudo, logo, na representação da direita estão representadas as parcelas selecionadas para levantamento com o TLS. Na tabela 4 está apresentada a estatística descritiva das 20 parcelas estabelecidas em ambiente SIG, e ainda, as 5 parcelas que foram selecionadas para levantamento com o TLS.

FIGURA 11 - APLICAÇÃO DO CHM E ESCOLHA DAS PARCELAS



FONTE: Elaborado pela autora



TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DO CHM POR PARCELA ESTABELECIDAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANA EM CURITIBA - PR

Parcela	CHM					Número de Araucariaa	Número total de árvores
	Mínimo (m)	Máximo (m)	Amplitude (m)	Desvio Padrão	Média (m)		
<b>1</b>	<b>0,1</b>	<b>25,69</b>	<b>25,59</b>	<b>3,97</b>	<b>19,21</b>	<b>6</b>	<b>20</b>
2	2,43	24,09	21,66	4,08	18,84	4	20
<b>3</b>	<b>1,06</b>	<b>25,2</b>	<b>24,14</b>	<b>4,42</b>	<b>20,06</b>	<b>4</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>0,1</b>	<b>22,17</b>	<b>22,17</b>	<b>4,53</b>	<b>16,73</b>	<b>4</b>	<b>31</b>
5	4,06	20,55	16,49	3,6	15,41	4	39
<b>6</b>	<b>2,01</b>	<b>22,55</b>	<b>20,54</b>	<b>4,12</b>	<b>17,75</b>	<b>3</b>	<b>19</b>
7	2,3	21,29	18,99	3,78	15,54	3	23
8	6,2	25,01	18,81	3,55	18,73	4	26
9	1,42	22,31	20,89	4,3	15,37	3	37
10	3,81	23,38	19,57	3,4	19,72	6	24
11	0,65	23,32	22,67	4,89	17,22	3	24
12	4,83	22,21	17,38	3,71	17,48	3	25
13	1,64	21,32	19,68	4,36	14,4	7	34
<b>14</b>	<b>1,56</b>	<b>23,44</b>	<b>21,88</b>	<b>3,81</b>	<b>19,73</b>	<b>7</b>	<b>31</b>
15	3,71	23,79	20,08	3,68	16,93	6	17
16	2,82	23,57	20,75	4,09	17,66	6	29
17	0,47	23,8	23,33	4,64	16,96	3	21
18	5,71	26,1	20,39	3,56	20,87	4	22
19	4,82	21,4	16,58	2,98	17,53	5	16
20	2,08	21,6	19,52	2,17	18,46	4	32

FONTE: Elaborado pela autora

### 3.4.2 Materialização das parcelas em campo

Foram instaladas 5 parcelas na área de estudo, abrangendo diferentes estratos florestais. Todas as árvores presentes foram demarcadas com tinta spray branca e rosa nas alturas de 1m e 1,60m, e ainda, foi colocada fita refletiva na demarcação do Cap.

As marcações foram realizadas no intuito de padronizar a medição manual, e ainda, para que a medição realizada no *software* fosse exatamente no mesmo lugar, sem que ocorresse divergência entre o processamento e a validação de dados.

O uso da fita refletiva foi utilizado como protocolo teste para estimativa em florestas nativas do Brasil com TLS, tendo em vista que a literatura não apresenta estudos relacionados a essas áreas.

A fita utilizada foi da marca Vonder, na cor prata, com dorso em polietileno reforçado com fio sintético trançado e adesivo acrílico, recomendado para manutenções em geral, como: reparos provisórios em materiais náuticos (bote, pranchas, entre outros), enfaixamento de materiais, empacotamento pesado, isolamento ou vedação temporária, sendo comercializada em lojas de manutenção doméstica e construção civil.

Nesse estudo, foram aplicados métodos automáticos para mensuração de dap, porém, a fita serviu como apoio, no caso de o teste com algoritmo não ser eficiente, e em caso da necessidade de fazer algum tipo de referência ou medição não automatizada em software de processamento LiDAR.

A representação da etapa de implementação das parcelas pode ser visualizada na Figura 12.

FIGURA 12- REPRESENTAÇÃO DAS ETAPAS REALIZADAS NO CAMPO



Marcação do ponto central com cano de pvc amarelo, e das extremidades com cano vermelho



Medição com trena (raio de 10m em relação ao ponto central). Orientação baseada nas direções N, NE, ES, S, SW, S



Medição do CAP com auxílio de baliza e marcação com spray branco



Plaqueamento dos indivíduos mensurados



Medição da altura com vertex



Marcação dos indivíduos no papel milimetrado e das coordenadas com GPS

FONTE: Elaborada pela autora

Conforme foi pré-estabelecido, cada parcela apresentou um ponto central demarcado com um cano de PVC pintado de amarelo, e a partir disso, foram distribuídos seis pontos a uma distância de 10m, tendo como base as orientações N, NE, ES, S, SW, WN. Os pontos da extremidade foram pintados de spray vermelho, sendo o ponto Norte o primeiro a ser colocado, e os demais baseando-se no sentido horário. Todos os pontos foram demarcados com auxílio de bússola e trena. Após a materialização das parcelas, todos os indivíduos com dap maior que 10 cm foram mensurados (cap e altura) e plaqueteados.

#### 3.4.5 Cubagem de árvores em pé

A determinação dos valores  $d_i$  e  $h_i$  foi feita com o Criterion RD 1000 que possibilitou a cubagem das árvores em pé. Diversas pesquisas têm utilizado esse tipo de dendrômetro óptico em estudos de cubagem e de quantificação de biomassa de árvores (CLARK et al., 2000; KALLIOVIRTA et al., 2005).

A vantagem da cubagem da árvore em pé, refere-se a não ser necessário abater a árvore, principalmente quando se relaciona a espécie onde o corte não é permitido, como é o caso da Floresta Ombrófila Mista. Além disso, pode-se considerar que as estimativas apresentam pouca diferença entre o valor observado e o real (COSTA et al., 2016).

Foi realizada a cubagem de árvore em pé apenas para os indivíduos de *Araucaria angustifolia*. De modo que, foram estabelecidas as medidas  $h_i$  de 1,3 m, 2m, 4m, e 6m como pontos em comum para todos os indivíduos. Optou-se por utilizar a altura máxima em comum de 6m, dada a dificuldade de visualização na altura máxima de algumas árvores utilizando o Criterion RD 1000, pois a área de estudo refere-se a uma floresta nativa, o que dificulta a visualização precisa do fuste a maiores alturas, tendo influência da copa de outras árvores.

Na Tabela 5 estão apresentadas as configurações do Criterion RD 1000.

TABELA 5 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CRITERION RD 1000

Especificações técnicas	
Faixa de medição de diâmetro	5 a 254 cm
Fator de Área Basal (FAB)	0,2 a 29,1 m <sup>2</sup> /ha
Inclinação	± 90°
Exatidão de diâmetro	± 6 mm a 24 m
Exatidão de inclinação	± 0,1°
FONTE: Ruza (2019)	

#### 3.4.6 Levantamento com o laser scanner terrestre (TLS)

O levantamento de dados TLS foi realizado em parceria com a Embrapa Florestas, por meio da participação no projeto Saltus III, constituído pelo sub-projeto denominado “Dinâmica de gases de efeito estufa e dos estoques de carbono em florestas naturais e plantadas: práticas silviculturais para mitigação e adaptação às mudanças climáticas”. A presente tese de doutorado está vinculada a atividade 3 do projeto, denominada como “Desenvolvimento de protocolos de medidas TLS em floresta nativa urbana no município de Curitiba/PR”.

##### 3.4.6.1 Levantamento TLS a nível de parcela

A aquisição de dados foi feita com um laser scanner terrestre de deslocamento de fase, o Faro Focus 3D X 330, que tem um alcance de 0,6 a 330 m, com um erro de ±2 milímetros, pode medir uma velocidade máxima de 976.000 pontos por segundo e fornece imagens de até 70 megapixels. Também inclui vários sensores, como o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), uma bússola, um sensor barométrico para medição de altitude e um compensador de eixo duplo (BUENO et al., 2016; FARO, 2019).

Há uma série de etapas que podem ser tomadas para aumentar a eficiência do tempo no campo. Por exemplo, é recomendável que os locais de varreduras sejam identificados e marcados antes do início da digitalização. Além

disso, as configurações do scanner podem aumentar significativamente o tempo e os recursos necessários, por exemplo, aumentar a resolução angular do scanner, aumenta exponencialmente o tempo de varredura. A decisão de capturar dados de retorno discretos ou de formas de onda completas, também pode afetar o tempo e os recursos necessários (WILKES et al., 2017).

As configurações do scanner também têm implicações para o hardware necessário, por exemplo, baterias externas adicionais e/ou armazenamento de dados. Recomenda-se que, baterias adicionais e armazenamento de dados sejam levados para o campo, de modo que a digitalização possa continuar, mesmo que uma bateria falhe ou o armazenamento a bordo do instrumento seja preenchido. Além disso, é importante que seja realizado um planejamento prévio quanto ao tempo de cada varredura, e ainda, qual o tempo necessário para o levantamento de cada parcela, pois se não houver tempo ou condição adversa para finalização de cada parcela, a mesma deverá ser reestabelecida e realizada desde a primeira varredura.

No processo de coleta de dados com o TLS foi localizado o ponto central da parcela, e partir disso, posicionou-se o equipamento, que foi montado em um tripé de levantamento (fabricante), de modo que, estivesse de forma segura e nivelado. Foram distribuídas esferas na área de abrangência da parcela, sendo firmemente colocados no chão, no intuito de evitar possíveis movimentos.

As esferas foram cobertas por papel de seda colorido (rosa, amarelo, azul claro, azul escuro, vermelho e prata), com o lado fosco para cima, no intuito de evitar qualquer tipo de interferência em relação à luminosidade. A coloração das esferas têm a finalidade de identificação específica no processo de registro.

O registro da nuvem de pontos é uma das etapas mais importantes do pré-processamento de dados TLS, tendo em vista, que erros associados podem inviabilizar a modelagem tridimensional da floresta, ocasionando divergências na modelagem de árvores individuais e por parcela, ou até mesmo, impossibilitando a utilização da nuvem de pontos. Portanto, a coloração das esferas foi uma etapa imprescindível na coleta de dados, visando otimizar e aumentar a confiabilidade do registro da nuvem de pontos.



Existe uma dificuldade em realizar o registro de nuvem de pontos em florestas com alta densidade de indivíduos, considerando que o software disponibilizado pelo fabricante não consegue localizar as esferas de forma automatizada, além do que, a grande diversidade encontrada no local, possibilita a ocorrência de erros nessa automatização.

Na Figura 13 é possível observar o exemplo de uma das parcelas inventariadas, o qual visualiza-se a dificuldade em aplicar o TLS em floresta nativa, dada a complexidade estrutural.

FIGURA 13 - NUVEM DE PONTOS BRUTA E COM PRÉ-PROCESSAMENTO PARA PARCELA REFERENTE À ÁREA DE ESTUDO

**Nuvem de pontos sem processamento referente a uma parcela da Floresta Ombrófila Mista**



**Nuvem de pontos da mesma área de estudo pré processada**



FONTE: Elaborado pela autora

Em função da complexidade da floresta, o pré processamento foi realizado de forma semiautomatizada, onde cada esfera foi nomeada com uma cor. O alinhamento inicial no software deu-se pela especificação da nomenclatura, seguido de um refinamento e análise de erros permitidos durante o registro. Na figura 14 é possível visualizar o processo de coleta de dados com o TLS e a disposição das esferas coloridas durante a varredura.

FIGURA 14 - LEVANTAMENTO COM O LIDAR SCENE FARO 330X E REPRESENTAÇÃO DE ESFERAS COLORIDAS



FONTE: Elaborado pela autora

Como fonte de apoio, utilizou-se papel milimetrado, no qual foi realizado o desenho da posição das árvores a nível de escala, tanto no quesito de distância entre árvores vizinhas, quanto da variação do cap. A parcela foi fotografada com câmera comum, no intuito de esclarecer possíveis dúvidas, caso necessário.

De acordo com Wilkes et al. (2017), para obter um registro satisfatório, é necessário um mínimo de quatro alvos comuns entre varreduras, de modo que, é importante que eles não estejam ocluídos (ou vários locais de varredura). Nesse estudo, optou-se por utilizar seis esferas revestidas com cores.

Os dados foram coletados por meio de varredura múltipla (MS), de modo que, o scanner a laser foi colocado em diferentes locais, sendo no ponto central e nas extremidades da parcela. A abordagem de varredura única é a mais simples e rápida para aquisição de dados, porém, conforme Torresan et al. (2018), a oclusão de árvores, ramos e arbustos pode resultar na omissão de até 20% das árvores presentes na parcela, motivo pelo qual foi evitado nesse estudo, considerando a alta densidade de indivíduos do local.

Liang et al. (2016), consideram que, o efeito de oclusão aumenta em função da medida de alcance do scanner, dependendo principalmente da estrutura da floresta. Estudos mostraram que até 40% de todas as árvores na parcela da amostra não são detectáveis a partir do centro da parcela ao usar a abordagem de varredura única (BROLLY e KIRALY, 2009; MURPHY et al., 2010; LOVELL et al., 2011; LIANG et al., 2012; ASTRUP et al., 2014).

Além disso, deve-se considerar que as condições meteorológicas (névoa, neblina ou chuva), que afeta não somente a transmissão do pulso do laser, como também, afeta as propriedades de espalhamento da superfície da folha. A digitalização só pode ser retomada quando as folhas estiverem secas e as condições abaixo do dossel estiverem claras. Dias com vento também não são ideais, pois mesmo árvores relativamente grandes podem balançar, apresentando problemas na nuvem de pontos (WILKES et al., 2017).

#### 3.4.6.2 Levantamento TLS a nível de árvore individual

Além da análise realizada nas cinco parcelas, foi realizado um levantamento TLS utilizando algumas araucárias distribuídas no entorno. As Araucárias foram escolhidas de acordo com a melhor opção de posicionamento para o TLS, de forma que os pulsos laser atingissem a copa. Na figura 15, foi apresentado como foi realizada a coleta de dados.

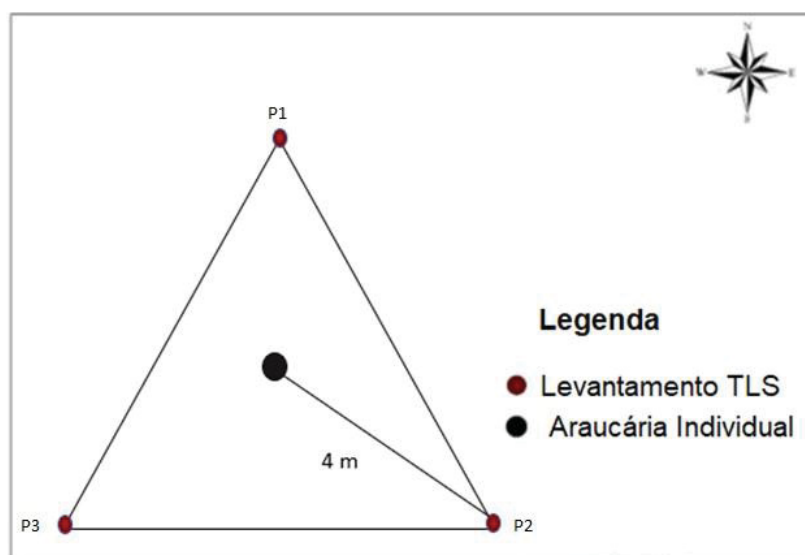
Apresentou-se um valor médio para representar a distância entre o posicionamento do scanner e a árvore, porém as varreduras tiveram variação, pois priorizou-se a posição mais estratégica no campo. Estudo realizado por Martins Neto et al. (2013), avaliou a melhor distância para a realizar a varredura



TLS em árvores individuais, de modo que, foram testadas as distâncias de 5, 10, 15 e 20 m. O valor de 5 m foi o menos indicado pelos autores, pois obteve os maiores erros, e ainda, devido ao ângulo de visada ser mais inclinado na vertical, o pulso laser captou muitos galhos, impedindo a modelagem fidedigna do fuste. O estudo foi realizado em duas árvores em um povoamento inequiano de *Pinus* spp., com uma idade média de doze anos.

Em florestas nativas, existe uma dificuldade em realizar o scanear a uma maior distância, tendo em vista que existe uma alta densidade de indivíduos, e ainda, devido à influência do sub-bosque.

FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DO LEVANTAMENTO LIDAR A NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL



FONTE: Elaborado pela autora

Raunonen et al. (2013), consideram que para escanear uma única árvore, deve-se utilizar um padrão radial ao redor do tronco da árvore e uma grade regular, sendo sugerido ainda, mínimo de três locais de varredura para capturar essa árvore.

#### 3.4.6.3 Registro de nuvem de pontos

Os dados brutos foram importados no software Scene Faro, todas as sete varreduras realizadas em cada plotagem foram mescladas para gerar uma nuvem de pontos tridimensional com efeitos de sombra reduzidos. Todos os

pontos dessa nuvem continham uma coordenada x, y e z. Para cada parcela, as nuvens de pontos resultantes com diferentes números de varreduras mescladas foram comparadas em termos de desempenho do modelo e duração do cálculo.

O fabricante e alguns estudos científicos recomendam que, o resíduo admissível da união das nuvens de pontos seja menor que 0,010 metros (1cm). Ou seja, este valor foi definido como valor máximo aceitável no processo de registro, considerando que todas as árvores trabalhadas nesse estudo, apresentaram resíduo inferior. Na figura 16 está apresentada a disposição das esferas possibilitando o registro. É possível visualizar a fita refletiva em destaque na imagem, porém, ela não foi utilizada no processamento de dados, tendo em vista que todas as etapas de processamento LiDAR foram realizadas de forma automatizada.

FIGURA 16: REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DAS ESFERAS E FITA REFLETIVA



FONTE: Autora

#### 3.4.6.4 Extração de árvores individuais

As araucárias foram individualizadas no software Scene Faro. O processo de individualização foi realizado de forma manual pelo usuário. Inicialmente, foi analisada a distribuição das árvores de cada parcela em ambiente SIG, a partir disso, as árvores foram identificadas conforme o plaqueteamento realizado no campo. As araucárias foram recortadas e nomeadas conforme a identificação de campo.

#### 3.4.6.5 Filtragem e remoção de ruídos

De acordo com Buck (2011), a geração de um modelo tridimensional acurado do fuste irá depender da qualidade dos dados disponibilizados para modelagem, sendo que o melhor modelo deverá ser alcançado trabalhando apenas com pontos que representem o tronco. Diante disso, é necessário realizar a filtragem da nuvem de pontos, que visa eliminar objetos isolados considerando um limiar de distância para ocorrência de pontos vizinhos, o valor de intensidade característica da superfície de interesse e a densidade de pontos em determinadas alturas da árvore. O autor considera ainda que, procedimentos semiautomatizados de filtragem são comumente empregados, ou seja, é realizada a eliminação de pontos que visualmente não pertencem ao tronco da árvore, onde o objetivo é realizar uma “limpeza” da superfície que será modelada. Todavia, a filtragem visual do tronco é um método manual, estando sujeito a erros grosseiros por parte do usuário do software que necessita de muito tempo e cuidado ao editar o arquivo de pontos.

No presente estudo, a remoção de ruídos das árvores individuais, foi realizada utilizando o software Scene Faro, o qual é disponibilizado pelo fabricante do laser scanner terrestre utilizado. Logo, as etapas específicas de processamento de dados serão explicadas em cada capítulo.

### 3.5 Conclusões

A coleta de dados utilizando o TLS na Floresta Ombrófila Mista foi considerada onerosa e difícil de ser realizada, tendo em vista que a densidade de indivíduos do local é considerada alta e complexa, quando comparada a áreas homogêneas. Porém, o uso de métodos alternativos como a fita refletiva, a coloração das esferas com papel de seda, facilitaram o levantamento de dados e pré processamento realizado.

O levantamento utilizando o laser scanner terrestre deve ser realizado com um planejamento prévio, de modo que, se tenha conhecimento da estrutura florestal a ser inventariada, e ainda, que seja analisado a melhor posição do TLS na parcela, evitando que ocorra o menor número de oclusão de indivíduos e sombreamento. Além disso, dada a dificuldade de trabalhar com a nuvem de pontos desses dados, destaca-se a importância de uso de soluções alternativas na etapa de levantamento, possibilitando a identificação nominal no processo de registro das varreduras. Quanto aos dados ALS utilizados, o levantamento foi adquirido pela universidade, portanto, não foi necessário realizar nenhum tipo de planejamento de coleta de dados.

Para a aplicabilidade no Bioma Mata Atlântica, considerou-se inviável o uso de varreduras simples, porém, sugere-se que, para futuros estudos sejam testados diferentes formas de amostragem e análise do número ótimo de scaneamentos para sistema multivarredura. Têm-se conhecimento que, quanto maior o número de varreduras, melhor será o resultado do produto final, evitando problemas de oclusão, porém, o planejamento também deverá levar em consideração a otimização do tempo de coleta e processamento de dados.

#### **4.0 CAPÍTULO III: Modelagem de biomassa acima do solo de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze usando varredura a laser terrestre e modelos de estrutura quantitativa**

##### **RESUMO**

O presente capítulo objetiva estimar a biomassa acima do solo (AGB) de *Araucaria angustifolia* usando varredura a laser terrestre e modelos de estrutura quantitativa. Inicialmente, as nuvens de pontos TLS foram recortadas, filtradas e foi realizada toda remoção de ruídos, foram ajustados modelos cilíndricos, triangulares e de estruturas quantitativas utilizando o algoritmo *TreeQSM*, sendo realizada a reconstrução em três dimensões de todas estruturas da árvore. Ao se comparar os valores de dap e altura estimados com o *TreeQSM* com os valores de dap mensurados no campo (IFC), obteve-se uma correlação linear de 0,92, e ao aplicar o Teste  $T^2$  de Hotelling para amostras pareadas, concluiu-se que não existe diferença estatística entre os métodos a nível de significância de 99%, para os valores dessas variáveis. Os valores de biomassa acima do solo variaram de 150,17 kg a 4453,82 kg por árvore. Obteve-se um RMSE de 5,31 %, viés de 3,32% e precisão de 7,94%. Na realização do teste de paralelismo, aplicado para testar a hipótese da não diferença entre os diâmetros ao longo do fuste, de modo que, foi possível afirmar que não existe efeito entre os dados obtidos com TLS e IFC ao longo do fuste. Portanto, conclui-se que o TLS aliado aos modelos de estrutura quantitativa são considerados uma ferramenta com potencial para estimar AGB em florestas nativas, tendo em vista que possibilita uma alta acurácia na modelagem de árvores individuais, além de possibilitar a automatização do processamento de dados.

Palavras-chave: *TreeQSM*, reconstrução tridimensional, nuvem de pontos, LiDAR, TLS.

### **CHAPTER III: Above ground biomass modeling of *Araucaria angustifolia* using terrestrial laser scanning and quantitative structure models**

#### **ABSTRACT**

This chapter aims to estimate the above-ground biomass (AGB) of *Araucaria angustifolia* using terrestrial laser scanning and quantitative structure models. Initially the clouds of TLS points were segmented, filtered and all noise removal was performed, cylindrical, triangular models and quantitative structures were adjusted using the TreeQSM algorithm, and the reconstruction in 3 dimensions of all tree structures was performed. When comparing the dbh and height values estimated with TreeQSM with the dbh values measured in the field (IFC), a linear correlation of 0.92 was obtained, and when applying the Hotelling  $T^2$  Test for paired samples, it was concluded there is no statistical difference between the methods at 99% significance level. The above-ground biomass values ranged from 150.17 kg to 4453.82 kg per tree. An RMSE of 5.31%, a bias of 3.32% and an accuracy of 7.94% were obtained. When performing the parallelism test between the two methods, it was possible to affirm that there is no effect between the data obtained with TLS and IFC along the stem. It is concluded that the TLS combined with the quantitative structure models are considered a tool with great potential to estimate AGB in natural forests, in view of the fact that it allows a high accuracy in the modeling of individual trees, in addition to enabling the automation of data processing.

**Keywords:** TreeQSM, three-dimensional reconstruction, point cloud, LiDAR, TLS



#### 4.1 INTRODUÇÃO

A Floresta Ombrófila Mista é um ecossistema muito particular do Brasil, pois abriga algumas das raras espécies de coníferas da América do Sul subtropical, de modo que, a Araucária é a espécie mais destacada, sendo a única a formar um ecossistema próprio, cuja biota é dominada por ela. As florestas de araucária nativa existem em pequenas propriedades na região sul do Brasil, com apenas uma pequena área (<1%) de cobertura ainda presente nas áreas protegidas de florestas maduras (ORELLANA e VANCLAY, 2018). É considerada a conífera mais importante do Brasil devido à sua importância comercial para madeira de boa qualidade e produção de sementes comestíveis que são valorizadas para o consumo humano, especialmente no sul do Brasil (PELYCO NETTO et al., 2011).

As florestas tropicais possuem alta diversidade, pois são caracterizadas por uma estrutura de dossel mais complexa quando comparadas a outros tipos de florestas (GHAZOUL e SHEIL, 2010; WHITMORE, 1982). Possuem um complexo ambiente físico, diversas pesquisas mostraram que a medição do estoque de carbono é difícil e muitas vezes repleta de incertezas. Tais incertezas derivam das dificuldades associadas às estimativas de altura e diâmetro à 1,30m de altura (dap) (LARJAVAARA e MULLER-LANDAU, 2013).

Quanto ao que se refere às técnicas de sensoriamento remoto utilizadas atualmente, o uso da tecnologia LiDAR está se tornando uma escolha primordial para estimar o AGB de floresta em comparação com sensores remotos ópticos, em função de problemas de saturação em respostas espectrais a copas densas com alta biomassa (BAZEZEW et al., 2018).

O laser scanner terrestre é uma tecnologia relativamente recente utilizada no setor florestal. Por meio de dados tridimensionais de alta resolução, as aquisições TLS oferecem um grande potencial para melhorar a qualidade da informação que tradicionalmente tem sido estimada usando dados de campo relativamente limitados e modelos pré-existent, ou ainda, calculados por meio de medições caras e demoradas de árvores abatidas (LIANG et al., 2016; WATT

e DONOGHUE, 2005). Os dados TLS possibilitam medições de árvores de forma automática, não invasiva e rápida. Diante disso, os dados de TLS têm sido utilizados com sucesso em vários propósitos, tanto no nível de árvore única quanto de parcelas, sendo utilizado para estimativas de diâmetro, altura, largura de copa, volume, biomassa e identificação de espécies (AKERBLOM et al., 2017; LIANG et al., 2014; SRINIVASAN, 2015).

Existe uma necessidade de ferramentas para o desenvolvimento de modelos operacionais para o processamento de dados TLS, já que para florestas tropicais ainda não existe uma maneira automatizada de medir dap, biomassa acima do solo e área basal. Derivar variáveis estruturais como biomassa em florestas tropicais é desafiador, considerando o denso sub bosque (TANAGO et al., 2018). A aplicação de métodos TLS em árvores tropicais de grande porte também é um desafio (TANAGO et al., 2017).

Os métodos de processamento de dados TLS que permitem a reconstrução automática de modelos 3D precisos da árvore foram definidos por Raumonen et al. (2013), como modelos de estrutura quantitativa (QSMs). Os QSMs permitem derivar métricas de modelagem geométrica como em galhos e ramificações de árvores, que podem ser totalmente modeladas (NEWNHAM et al., 2015). Os modelos representam as árvores como coleções hierárquicas de cilindros ou outros blocos de construção que fornecem o volume e o diâmetro dos segmentos de ramificação necessários para estimar a biomassa total acima do solo. A teoria por trás de alguns métodos de derivação do QSM (XU et al., 2007; LIVNY et al., 2010) baseia-se nas leis de escala alométrica em biologia (WEST et al., 1997), que descreve os sistemas de distribuição de plantas vasculares por rede de ramificação. Os dados TLS fornecem um nível mais alto de detalhamento tridimensional da floresta e estrutura de árvores individuais, permitindo medições diretas de parâmetros estruturais florestais, como dap e altura das árvores.

Os modelos de estruturas quantitativas (QSMs) são considerados uma boa opção, tendo em vista que permitem o cálculo de vários outros recursos. Além disso, é possível combinar as variáveis calculadas do QSM com recursos computacionais diretamente da nuvem de pontos LiDAR.



## 4.2 Objetivos

### 4.2.1 Objetivo geral

Estimar a biomassa acima do solo (AGB) de *Araucaria angustifolia* utilizando varredura a laser terrestre e modelos de estrutura quantitativa.

### 4.2.2 Objetivos específicos

- Estimar dados de diâmetro a 1,30 m de altura (dap), altura (h) e volume de *Araucaria angustifolia*, por meio de modelos de estruturas quantitativas e dados TLS, afim de valida-los com os dados de inventário florestal convencional.
- Estimar a biomassa acima do solo (AGB) de *Araucaria angustifolia* e apresentar modelos estatísticos que relacionem com variáveis dendrométricas extraídas do TLS e de indivíduos abatidos.
- Mensurar a incerteza associada ao uso de estruturas quantitativas e dados TLS na modelagem de AGB para *Araucaria angustifolia* por meio de análise estatística multivariada.

## 4.3 Hipótese

É possível utilizar modelos de estruturas quantitativas para estimar AGB e variáveis dendrométricas de *Araucaria angustifolia* por meio de dados TLS de forma acurada.

## 4.4 Material e métodos

### 4.4.1 Área de estudo e coleta de dados

A área de estudo utilizada neste capítulo compreende cinco parcelas e dez Araucárias scaneadas individualmente, obtidas em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista urbano no município de Curitiba - PR. Detalhes sobre a coleta de dados e a região geográfica foram apresentados no Capítulo 2. A base de

dados utilizada compreende informações obtidas por meio de inventário florestal convencional e levantamento com laser scanner terrestre.

#### 4.4.2 Inventário florestal convencional

##### 4.4.2.1 Estimativa de volume

O volume é considerado uma das informações de maior importância para o conhecimento do potencial disponível em um povoamento florestal, tendo em vista que, fornece subsídios para a avaliação do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas (THOMAS et al., 2006).

Foi realizado o inventário florestal convencional nas mesmas árvores utilizadas pelo levantamento TLS, no intuito de validar as medições e comparar a acurácia do método testado, analisando se existe diferença estatística entre os métodos a nível de significância de 99%.

O cálculo do volume individualizado foi realizado com a equação de Spurr logaritimizado, ajustado por Sanquetta et al. (2016) especificamente para *Araucaria angustifolia*. O modelo utilizado apresentou um  $R^2$  ajustado de 0,99 e Erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx %) de 8,33, conforme a Equação 1.

$$\ln(v_i) = \beta_0 + \beta_1(\ln(dap_i^2 h_i)) \quad [1]$$

Em que:

$\ln$  = logaritmo natural;

$v_i$  = volume estimado da árvore ( $m^3$ );

$h_i$  = altura total da árvore (m);

$dap_i$  = diâmetro à 1,30 m de altura (cm);

$\beta_0, \beta_1$  = coeficientes de regressão.

Conforme recomendam os autores, os valores adotados para  $\beta_0$  foi de -9,6687, e para  $\beta_1$  foram de 0,96499.

#### 4.4.2.2 Quantificação de biomassa

Foram geradas equações de biomassa acima do solo, utilizando uma base de dados com 45 Araucárias abatidas, as quais foram cortadas e pesadas pelo método direto, provenientes de outra fonte de dados. Foram 30 árvores provenientes de um plantio e 15 de uma floresta natural, com condições semelhantes as apresentadas nesse estudo. Determinou-se as massas frescas em campo de toda a sua biomassa, separada em compartimentos (fuste sem casca, casca, galhos e folhas). Na Tabela 6 estão apresentados os modelos testados.

TABELA 6 - MODELOS DE BIOMASSA TESTADOS

Modelo	Modelo testado	Autor
1	$AGB = \beta_0 + \beta_1 * (d^2 * h)$	Spurr
2	$AGB = \beta_0 + \beta_1 * (h) + \beta_2 * (d^2) + \beta_3 * (d^2 * h)$	Stoate
3	$AGB = \exp(\beta_0) + (\beta_1 * \ln(dap)) + \beta_2 * \ln h$	Schumacher Hall
4	$AGB = \exp(\beta_0 + \beta_1) * \ln(d * h)$	-

$\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  = coeficientes dos modelos;  $\ln$  = logaritmo neperiano; AGB = biomassa acima do solo (kg); dap = diâmetro à 1,30m de altura (cm); h = altura total (m).

A escolha do melhor modelo deu-se pela distribuição gráfica dos resíduos, preferindo a obtenção de resíduos homogêneos, seguido pelos menores valores do erro padrão da estimativa (Syx %) e maiores de  $R^2$ .

As 45 árvores abatidas utilizadas para a geração dos modelos de biomassa, diferem das 30 árvores que foram utilizadas nas estimativas geradas pelo TLS, ALS e IFC. Porém, tratam-se de Araucárias localizadas em regiões próximas a área de estudo.

#### 4.4.2.3 Inventário florestal com o laser scanner terrestre

A coleta de dados e o pré-processamento realizados com o laser scanner terrestre estão descritos detalhadamente no Capítulo 2.

#### 4.4.2.4 Aplicação do TreeQsm

Após as nuvens de pontos terem sido recortadas, filtradas e feita toda remoção de ruídos, foram ajustados os modelos cilíndricos utilizando o algoritmo *TreeQSM*.

De acordo com Raunonen et al. (2013), reconstruir árvores usando o *TreeQSM* é semiautomático, considerando-se que requer a entrada de alguns parâmetros. O *TreeQSM* particiona a nuvem de pontos em pequenos “*patches*” de superfície conectados e os utiliza para reconstruir cada segmento da árvore. Em seguida, cilindros são encaixados nos segmentos e características geométricas e topológicas são obtidas. A variável de entrada mais importante é o diâmetro ( $d$ ), que define o tamanho dos menores “*patches*” que serão considerados na modelagem.

Além disso, a partição em *patches* é aleatória e, portanto, a repetição da reconstrução sempre resulta em QSMs diferentes com valores próximos, mesmo que todas as entradas sejam iguais. Para avaliar a robustez da variável  $d$ , trabalhos anteriores (CALDERS et al., 2015; TANAGO et al., 2017), focaram na otimização do volume total e não na estrutura detalhada dos galhos das árvores. Eles produziram vários modelos para cada caso e calcularam a média e o desvio padrão dessas repetições.

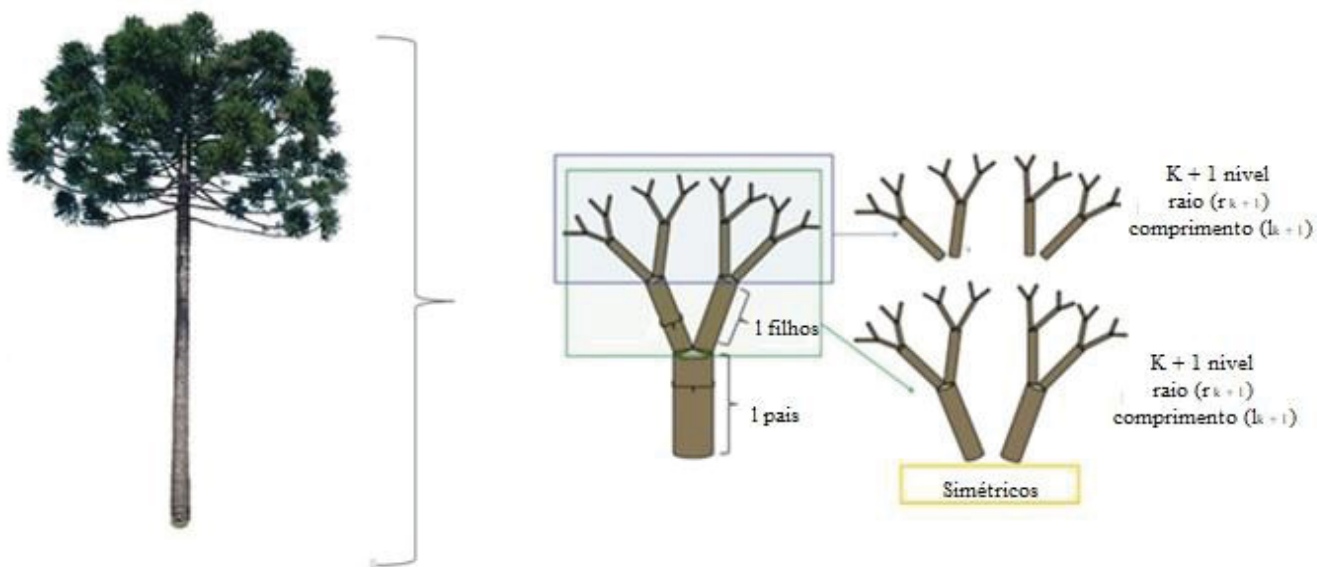
Para esse estudo foram ajustados QSMs para as 30 árvores usando valores para o parâmetro  $d$  variando de 0,05 a 0,90 com um incremento de 0,05, de modo que, o melhor valor  $d$  foi determinado baseando-se na comparação com os dados de campo. A ordem de ramificação dos QSMs foi organizada para adicionar um nível em cada nó de ramificação.

A estrutura geométrica e a ordem de ramificação dos QSMs são reconstruídas seguindo as medidas das árvores analisadas. Um nó de ramificação QSM é definido como um cilindro QSM do qual dois ou mais cilindros são originados. Este cilindro define a terminação de uma ramificação QSM e os seguintes cilindros são a origem de novas ramificações QSM. Em seguida, a ramificação QSM é definida como uma coleção de cilindros QSM consecutivos que se originam de um nó de ramificação QSM e terminam: em outro nó de ramificação do QSM, quando um cilindro QSM atinge a medida em

cm de diâmetro pré-estabelecida como valor mínimo, ou quando o ramo QSM termina.

Na figura 17 está representado um resumo de como o algoritmo determina as ramificações para serem utilizadas.

FIGURA 17 - RAMIFICAÇÕES ESTABELECIDAS PELO ALGORITMO TREEQSM



FONTE: Adaptado de Raumonen (2012).

A programação computacional realizada para aplicação dos modelos de estruturas quantitativas aplicados as Araucárias está descrita no anexo 1.

#### 4.4.2.5 Análise estatística

Após a geração das variáveis dendrométricas utilizando o algoritmo TreeQSM, provenientes dos dados TLS, realizou-se as estimativas da biomassa acima do solo e de volume, as mesmas foram comparadas com as mensurações provenientes do inventário convencional, por meio de análise multivariada no software MATLAB, versão para estudantes. Além disso, foram calculados o RMSE (*root mean square error*), viés, acurácia e precisão.

A Raiz quadrada do Erro Quadrático Médio percentual (*Root Mean Square - RMSE*), é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que o RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. O RMSE é definido de acordo com a equação 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)}} \times 100 \quad [2]$$

Onde:

$\bar{X}$  = média do valor observado da variável de estudo

$\bar{y}$  = média do valor observado da variável predita

De modo geral, o viés e a precisão combinados definem a performance de um estimador, sendo que quanto maior o viés, menos preciso o estimador é, e menor é sua capacidade de estimar acuradamente um ponto (WALTHER e MOORE, 2005). Acurácia é definida como a distância entre valores estimados e os valores reais (KREBS, 2007; ZAR, 2009).

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - y_{est})}{n} \quad [3]$$

$$\bar{e}_{\%} = \frac{\bar{e}}{\bar{y}_{obs}} \cdot 100 \quad [4]$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - \bar{e} - y_{est})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n - 1}} \quad [5]$$

$$S_{e_{\%}} = \frac{S_e}{\bar{y}_{obs}} \cdot 100 \quad [6]$$

$$m_x = \sqrt{(S_e)^2 + (\bar{e})^2} \quad [7]$$

$$m_{x_{\%}} = \frac{m_x}{\bar{x}} \cdot 100 \quad [8]$$

Onde:

$\bar{e}$  é o viés,  $\bar{e}_{\%}$  é o viés em porcentagem

$e_i$  é o erro sistemático para i-ésima árvore

$y_{obs}$  é a biomassa observada

$y_{est}$  é a biomassa estimada

$\bar{y}_{obs}$  é a média da biomassa observada

$n$  é o número de árvores

$S_e$  é a precisão,  $S_{e\%}$  é a precisão em porcentagem,

$m_x$  é a acurácia e  $m_{x\%}$  é a acurácia em porcentagem.

Além disso, avaliou-se a não diferença estatística entre os valores das variáveis: dap, altura total, volume e AGB simultaneamente, obtidos pelo inventário florestal convencional (campo) em comparação as métricas extraídas pelo TLS. O teste de hipótese simultâneo para o caso é apropriado, dada a evidência da correlação entre as variáveis. Assim, foi realizado uma inferência acerca dos vetores de média pareados, por meio do teste  $T^2$  de Hotelling (JOHNSON e WICHERM, 1998), sendo esse teste análogo ao teste *t-student* para amostras pareadas utilizado em análises univariadas.

$$T^2 = n (\bar{\underline{D}} - \underline{\delta})' S_d^{-1} (\bar{\underline{D}} - \underline{\delta}) \quad [9]$$

onde:

$T^2 = T^2$  de Hotelling

$$\bar{\underline{D}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \underline{D}_j,$$

$$d_{1j} = X_{11j} - X_{21j}$$

$$d_{2j} = X_{12j} - X_{22j}$$

$\vdots$

$$d_{pj} = X_{1pj} - X_{2pj}$$

$$D_j' = [\underline{d}_1 \quad \underline{d}_2 \quad \cdots \quad \underline{d}_p]$$

$$S_d = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\underline{D}_j - \bar{\underline{D}})(\underline{D}_j - \bar{\underline{D}})'$$

$n$  = número de amostras

O resultado a uma probabilidade de 99% foi comparado com a distribuição de  $F_{p,n-p}(\alpha)$ .

$$T^2 \geq \frac{(n-1)p}{n-p} F_{p,n-p}(\alpha) \quad [10], \text{ para rejeitar a hipótese da nulidade}$$

Foram comparados os valores das métricas de diâmetros a diferentes alturas, obtidos pela cubagem parcial em campo mensurados com o Criterion RD1000 com as métricas extraídas pelo TLS. Foram utilizados diâmetros nas alturas de 1,3 m, 2 m, 4 m e 6 m, para os dois sistemas.

A técnica aplicada na análise foi o *Profile Analysis*, esse procedimento pode ser utilizado quando as observações em um mesmo elemento são correlacionadas (auto-correlação dos diâmetros ao longo do fuste) e a variável mensurada é tomada na mesma escala de medida.

De acordo com Rancher (1934), a análise de perfil é baseada em três hipóteses, sendo que a primeira avalia se os grupos são paralelos entre pontos de observação. Para tanto, é realizada a comparação dos dois perfis sob a hipótese do paralelismo, definido por meio das inclinações e expresso pela equação 11. O teste de  $T^2$  foi calculado pela equação 11.

$$H_{01}: C\mu_1 = C\mu_2$$

$$T^2 = \frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2} (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)' C' [CS_{pl} C']^{-1} C (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \quad [11]$$

Os dois perfis são paralelos se as duas inclinações de cada segmento forem as mesmas. Caso a hipótese  $H_{01}$  seja rejeitada, pode-se calcular qual variável mais contribuiu para o não paralelismo entre as curvas com a equação 12.

$$a = (CS_{pl} C')^{-1} C (\bar{y}_1 - \bar{y}_2) \quad [12]$$

A segunda hipótese avalia se os grupos estão em níveis iguais em pontos de observações, sendo expressa pela equação 13. O teste de  $t$  pode ser calculado pela equação 13.

$$H_{02}: j'\mu_1 = j'\mu_2$$



$$t = \frac{j'(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)}{\sqrt{j' S_{pl} j (\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}} \quad [13]$$

A terceira hipótese avalia se os perfis exibem planicidade ao longo dos pontos de observações, e para testar isso foi realizado o cálculo conforme equação 14. Posteriormente, foi calculado o valor de  $T^2$  conforme equação 15.

$$H_{03}: \frac{1}{2} C (\mu_1 + \mu_2) = 0 \quad [14]$$

$$T^2 = (n_1 + n_2)(C\bar{y})' (CS_{pl}C')^{-1}C\bar{y} \quad [15]$$

#### 4.4.2.6 Análise de perfil multivariada

Três hipóteses de interesse estão associadas e foram testadas na análise de perfil:

$H_0^{(1)}$  – Os perfis médios de resposta correspondentes à obtenção dos valores por TLS e relação a cubagem em pé e paralela. Não existe interação entre os dados obtidos com o TLS e com o inventário florestal convencional ao longo do perfil do fuste.

$H_0^{(2)}$  – Os perfis médios de resposta correspondentes aos tratamentos são coincidentes. Ou seja, não existe diferença nos valores médios obtidos entre os métodos TLS e cubagem em pé.

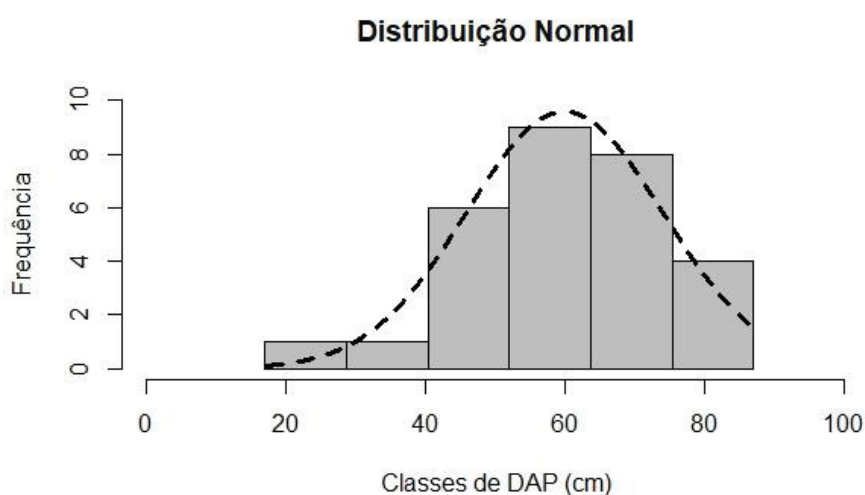
$H_0^{(3)}$  – Os perfis médios de resposta obtidos por TLS e cubagem em pé são paralelos ao eixo das abscissas, ou seja, ao longo do fuste são obtidos os mesmos valores de diâmetro. O que se deseja na pesquisa é a não rejeição da hipótese da nulidade para as hipóteses 1 e 2, as quais revelam a proximidade dos valores medidos pelos métodos TLS e cubagem.

#### 4.5 Resultados e discussão

Foram mensuradas 30 araucárias, sendo 20 distribuídas entre as 5 parcelas, e 10 medidas individualmente na floresta. A escolha das árvores baseou-se na aplicação do CHM na nuvem de pontos ALS e melhor posicionamento para o TLS em termos de árvores individuais.

Na figura 18 é possível visualizar o histograma de frequência das árvores amostradas nesse estudo.

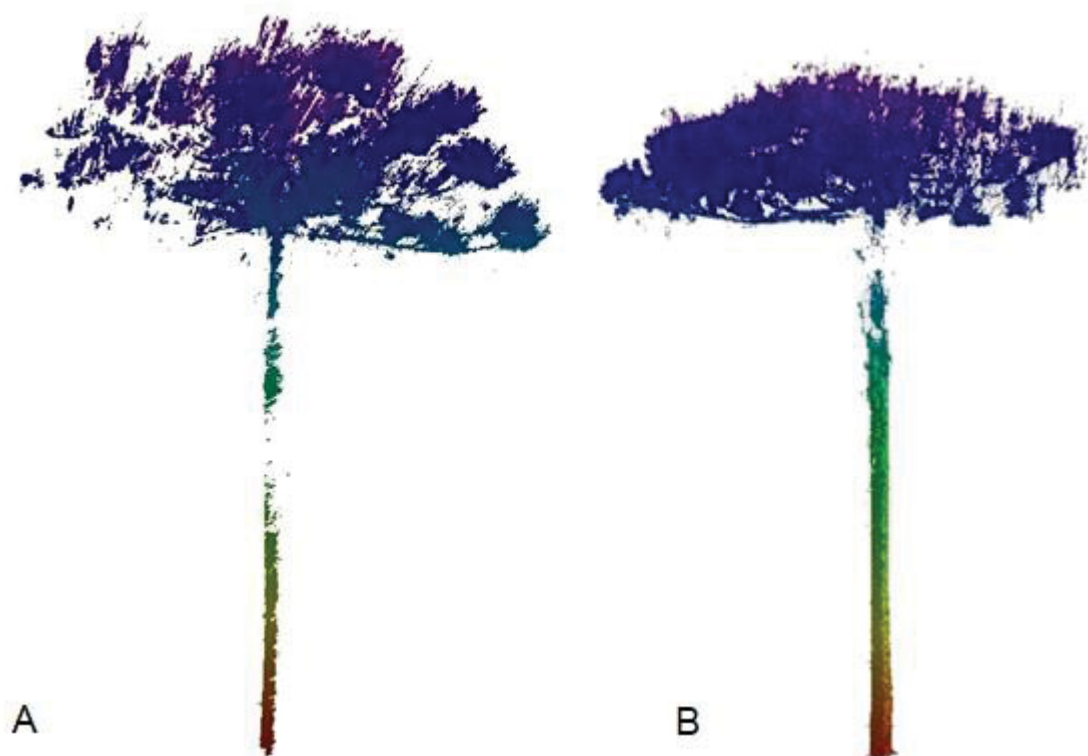
FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO DE ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



FONTE: Elaborado pela autora

Ao se comparar os dados gerados pelo inventário florestal convencional e com TLS, analisou-se a diferença entre os valores gerados pelos dois métodos individualmente árvore por árvore, de modo que, considerou-se importante o descarte de uma árvore que não apresentava uma distribuição uniforme na nuvem de pontos, conforme pode ser visualizado na Figura 19a.

FIGURA 19- REPRESENTAÇÃO DE ÁRVORE COM FALHAS NA NUVEM DE PONTOS, NA ESQUERDA (A) A OCLUSÃO IMPOSSIBILITA A APLICABILIDADE DO ALGORITMO, NA DIREITA (B) A OCLUSÃO NÃO TEM INFLUÊNCIA NO PROCESSAMENTO DE DADOS



FONTE: Elaborado pela autora

A Araucária (Figura 19a) apresenta falhas na nuvem de pontos referente à posição do fuste, o que impossibilita o algoritmo calcular corretamente os valores de volume e dap, pois torna-se inviável realizar a triangulação para geração de tais estimativas. Uma das condicionantes para evitar incertezas associadas ao processamento do TreeQSM, refere-se à aplicação do algoritmo em regiões com densidade de pontos muito baixa.

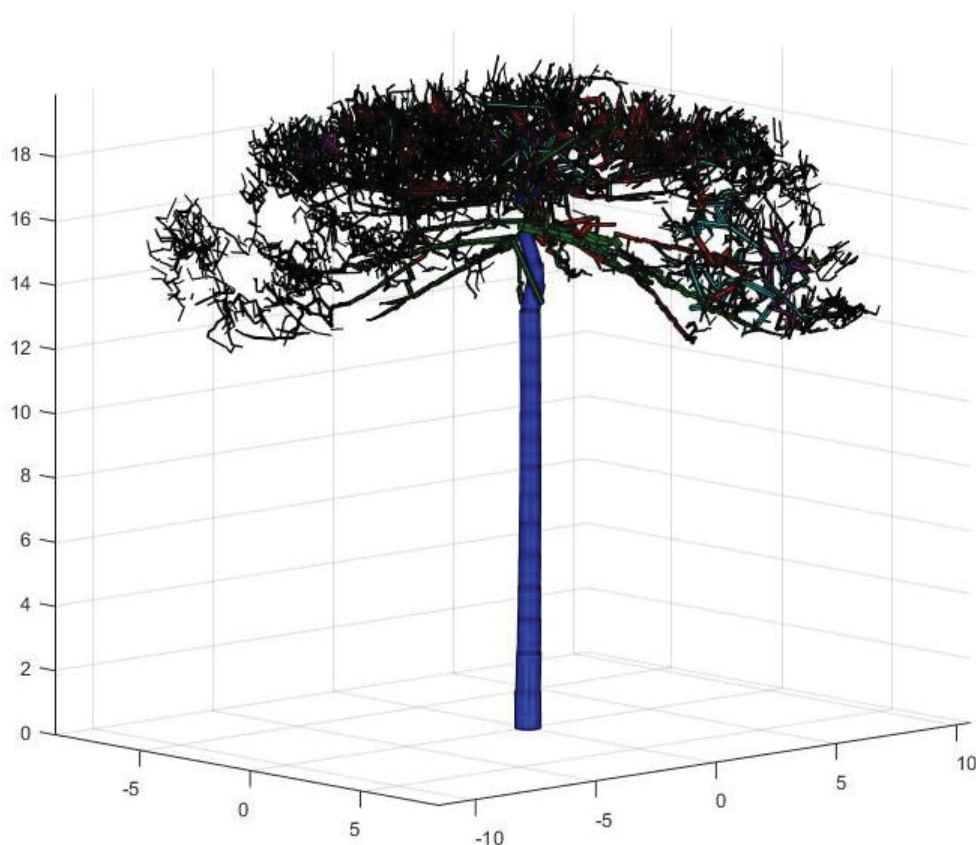
Percebe-se que na Figura 19b (esquerda) a oclusão é menor, o que não impossibilita o algoritmo TreeQSM de realizar a triangulação e realizar as estimativas necessárias. Essa problemática já era esperada, tendo em vista que a literatura já descreve esses problemas no uso do TLS em ambientes florestais de grande densidade.

A confiabilidade de saída dos dados do TreeQSM está diretamente relacionada à qualidade da nuvem de pontos (dados de entrada) e da precisão avaliada para a reconstrução tridimensional. A qualidade da nuvem de pontos

é influenciada por vários fatores, como: a distância entre o scanner TLS e a árvore scaneada, os parâmetros de varredura, tipo de floresta e ambiente ao redor da árvore. Considera-se que a taxa de oclusão foi presumida como baixa, tendo em vista que das 30 árvores scaneadas, apenas uma não pôde ser processada.

O algoritmo *TreeQSM* é capaz de reconstruir ramos menores com alta precisão quando esses ramos têm densidade de pontos suficientes para uma reconstrução adequada (RAUMONEN et al., 2013; CALDERS et al., 2015; ÅKERBLOM et al., 2017). Na Figura 20 está apresentada a reconstrução tridimensional gerada pelo algoritmo.

FIGURA 20 - RECONSTITUIÇÃO TRIDIMENSIONAL DA ARAUCÁRIA GERADA PELO TREEQSM



FONTE: Elaborado pela autora

Resultados satisfatórios podem ser obtidos quando modelos de estruturas quantitativas são aplicados a nível de árvore única. Neste estudo, os dados foram adquiridos a nível de parcela e a nível de árvore individual, e a segmentação da nuvem de pontos foi realizada a nível de árvore individual. As oclusões no topo da copa das árvores são consideradas importantes, tendo em vista que, às vezes levam a reconstrução de galhos que não estão presentes, e consequentemente, o volume desses ramos é estimado erroneamente. Além disso, em alguns casos a falha impossibilita que o algoritmo possa fazer as estimativas corretamente.

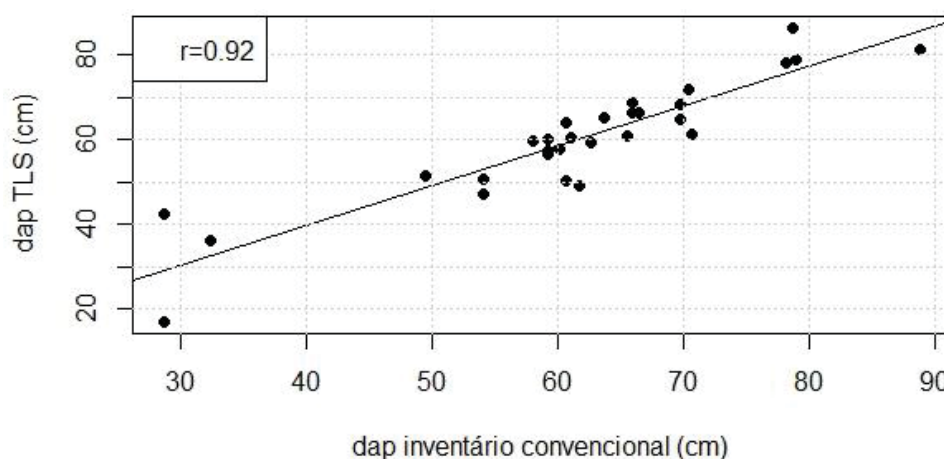
De acordo com Lau et al. (2018), a oclusão (a ocultação de alguns elementos estruturais por outros) é um grande problema para uso do LiDAR em florestas tropicais, de modo que, devem ser utilizados métodos alternativos para evitar oclusão e captar ramos em detalhe dentro do dossel. Considera-se que o scanner deve estar localizado dentro de uma lacuna no sub-bosque ou em posições flexíveis, o qual tenha maior recobrimento da área. Além disso, a implementação de um projeto de amostragem radial com locais flexíveis ao redor da árvore, possibilita uma densidade de pontos distribuída mais uniformemente ao longo da árvore, evitando a oclusão pelo ambiente (WILKES et al., 2017; LAU et al., 2018).

Alguns autores consideram ainda, que algumas técnicas são comuns para evitar esse tipo de problema, como por exemplo, combinar nuvens de pontos de várias posições ao redor de uma área alvo, aumentando a probabilidade de que qualquer espaço esteja no campo de visão de pelo menos um local de varredura (ZANDE et al., 2008; WILKES et al., 2017).

Além disso, uma outra opção para minimizar o processo de oclusão causada pela vegetação seria elevar o TLS (por exemplo, usando guindastes ou pontos altos no terreno), de modo que, o sombreamento na nuvem de pontos ocorra principalmente abaixo dos objetos e as superfícies superiores sejam amostradas consistentemente (VIERLING et al., 2013; ANDERSEN et al., 2018).

O algoritmo TreeQSM gera três classes de valores para o dap, sendo o método com estruturas quantitativas, por meio de cilindros e por triangulação. Foi realizada uma análise de correlação entre os dados gerados pelo algoritmo TreeQSM, com os dados obtidos por meio do inventário florestal convencional. O valor de  $r$  para o método comparativo de estruturas quantitativas (QSM) foi de  $r = 0,92$ , para o método utilizando cilindros foi de  $r = 0,91$  e ainda, o método utilizando triangulação apresentou  $r = 0,83$ . Diante disso, confirma-se que o método de estruturas quantitativas foi considerado o melhor método correlacionado com os dados obtidos no campo. Na Figura 21 está representado o gráfico de correlação linear do dap obtido com o TreeQSM e o inventário convencional.

FIGURA 21 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O DAP OBTIDO COM TREEQSM E INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL PARA ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



FONTE: Elaborado pela autora

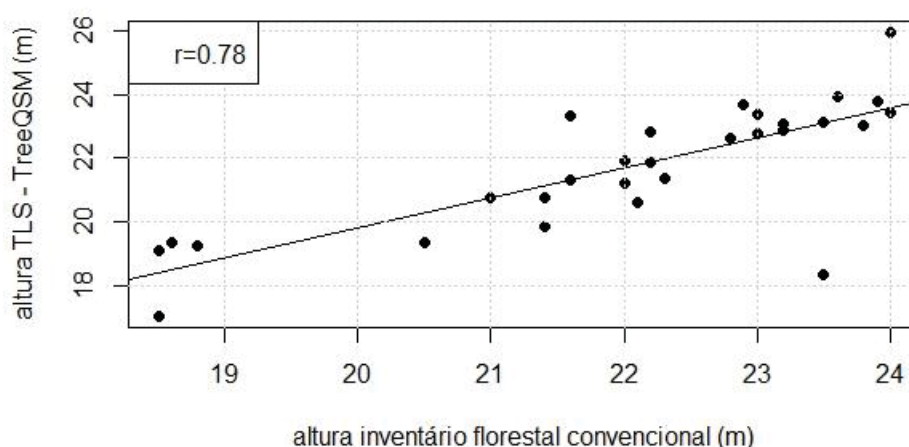
Considera-se que existe uma alta correlação linear entre os dados de dap obtidos entre o TLS e o inventário florestal convencional, além disso obteve-se um RMSE de 5,31% entre os dados observados, um viés de 3,32% e uma precisão de 7,94%.

De acordo com Silva et al. (2017), considera-se que a precisão é igual ou superior a um inventário florestal convencional na floresta tropical, quando tem-se uma acurácia do modelo aceito como RMSE e viés relativos de  $\leq 20\%$ .

Portanto, considera-se que os valores encontrados nesse estudo foram acurados em relação ao inventário florestal convencional.

Quanto à análise de altura gerada pelo algoritmo e o inventário convencional, observou-se um valor de  $r = 0,78$ . Na figura 22 está apresentado o gráfico de correlação linear entre a altura estimada por meio do inventário florestal convencional e com o TLS.

FIGURA 22 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A ALTURA OBTIDA COM O TREEQSM E O INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL PARA *ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA* EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



FONTE: Elaborado pela autora

De acordo com Srinivasan et al. (2015), além do dap, a altura da árvore também é uma importante informação qualitativa sobre a parcela ou posição e informação quantitativa sobre a árvore. A altura das árvores está fortemente relacionada a várias características biofísicas e é uma função da composição de espécies e da qualidade do local. O dap e as alturas das árvores estão positivamente correlacionadas com a biomassa, uma vez que o diâmetro do fuste aumenta à medida que as árvores crescem, aumentando assim a quantidade de folhagem suportada pelas árvores.

A comparação da altura de árvores de inventário convencional em relação a alturas de árvores derivadas de TLS a partir da aplicação de QSMs, apresentou



uma correlação linear alta. Os dados observados nesse estudo, apresentaram melhores resultados em relação ao que a literatura vem demonstrando.

De acordo com Silva et al. (2012), em florestas nativas, a altura total das árvores pode ter importante significado ecológico e para fins de manejo, à medida que ajuda a compreender a estrutura vertical da comunidade. De modo que, por meio dessa variável, é possível identificar as espécies que apresentam maior importância ecológica.

Chasmer et al. (2018), compararam alturas medidas em campo e alturas derivadas de TLS para 15 árvores. Os resultados indicaram que as alturas derivadas de TLS subestimaram as alturas medidas no campo em aproximadamente 1,2 m, devido à redução da penetração de pulsos de laser dentro do dossel superior. Huang et al. (2012) demonstraram um método automático para determinar as alturas das árvores a partir de dados de TLS, e obtiveram uma correlação de 0,95 para alturas de árvores derivadas de TLS e alturas medidas em campo.

Os primeiros estudos utilizando dados TLS para estimar altura de árvores não eram considerados favoráveis, independentemente do método usado (modos únicos ou múltiplas varreduras). Esses baixos valores de precisão relacionavam-se à incerteza da visibilidade das copas das árvores em dados de TLS. Medições de altura de árvores usando TLS para inventários florestais estão sendo estudadas minuciosamente, principalmente porque os valores de altura invalidam os valores consequentes de estimativa de volume.

Hopkinson et al. (2014), determinaram as alturas das árvores a partir dos dados de TLS ajustando as primitivas vetoriais, e suas análises revelaram que as alturas das árvores derivadas de TLS subestimaram as medidas de campo em aproximadamente 1,5 m. Esta subestimação estava relacionada à redução da densidade de pontos LiDAR no dossel superior, um resultado direto da oclusão causada pelo dossel inferior e posição do sensor.

A medição direta da altura das árvores por meio do TLS ainda é muito difícil, porque as copas das árvores são comumente sombreadas por outras árvores ou partes da copa da árvore medida na nuvem de pontos, ou seja, as copas largas

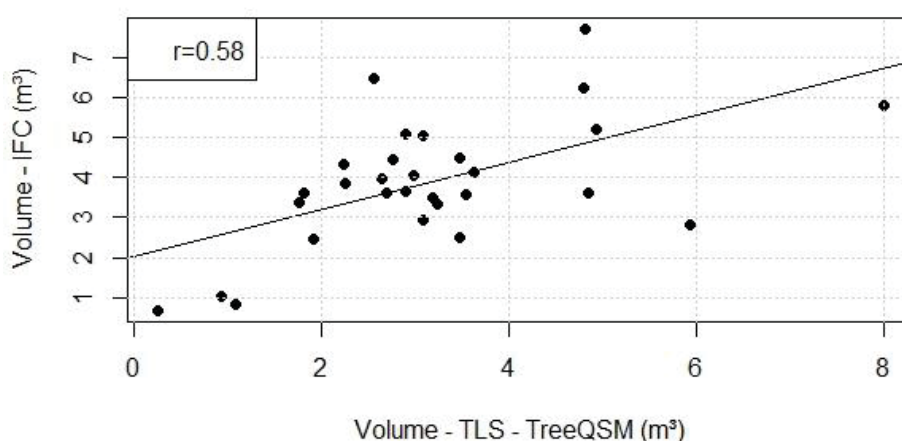
de árvores mais altas não permitem que um scanner próximo detecte as copas das árvores menores.

A copa das árvores tem sido observada a partir de dados de TLS em parcelas de amostras esparsas demonstrado em vários testes, por exemplo, em Huang et al. (2011); Fleck et al. (2011). No entanto, estimar as copas das árvores a partir de dados TLS em parcelas de amostras densas, continua a ser um desafio (LIANG et al., 2016).

O algoritmo TreeQSM também estimou o volume das Araucárias, de modo que, os dados foram comparados com a estimativa de volume geradas pelo inventário convencional.

Na Figura 23 está apresentado o gráfico de correlação linear entre os dados obtidos com o TLS e com o inventário florestal convencional (IFC).

FIGURA 23 - GRÁFICO DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE O VOLUME OBTIDO COM O TREEQSM E O INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL DA *Araucaria Angustifolia* EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBROFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



FONTE: Elaborado pela autora

O volume gerado pelo TreeQSM apresentou correlação linear média com os dados de inventário florestal convencional. Considera-se que o modelo utilizado pelo algoritmo TreeQSM não foi considerado eficiente, possivelmente por tratar-se de uma espécie scaneada em floresta nativa, e conforme relatado

anteriormente, associa-se também a oclusão da parte superior de alguns indivíduos de *Araucaria angustifolia*.

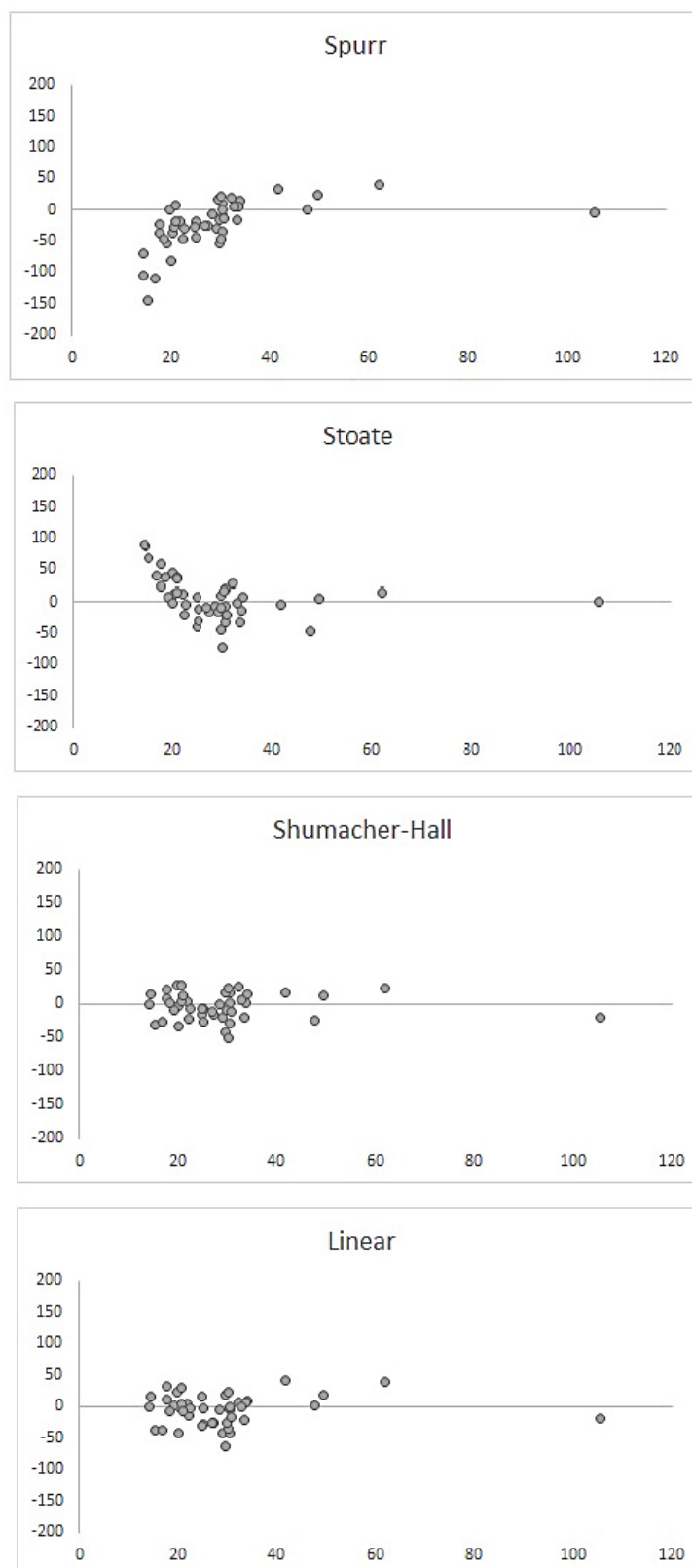
O uso da modelagem TreeQSM permite a extração de um grande número de parâmetros, por exemplo ordem de ramificação, ângulo e raio, altura do fuste, entre outros. Isso pode ser muito útil para análise em florestas comerciais com estrutura menos complexa e menor densidade de indivíduos, quando comparada com a amostragem utilizada neste estudo.

Lau et al. (2018), consideram que a aplicabilidade em árvores tropicais é mais difícil, devido as camadas florestais complexas com espécies perenes, que levam a oclusão no sub-bosque, frequentemente alterando as condições meteorológicas e desafios logísticos, bem como as configurações do scanner, requisitos de hardware, distância do equipamento, área da parcela.

De acordo com Schneider et al. (2019), medir a distribuição tridimensional e a densidade do material vegetal em densas florestas tropicais e temperadas é um desafio devido à oclusão, o efeito de elementos que bloqueiam a medição e levam a volumes não observados no espaço 3D. Essas medidas são altamente relevantes, uma vez que a varredura a laser terrestre está emergindo como uma referência para estimativas de biomassa não destrutiva (STOVALL et al., 2017, MOMO TAKOUDJOU et al., 2018), e ainda para a reconstrução de árvores e copas por meio de novas tecnologias e algoritmos.

A biomassa acima do solo da *Araucaria angustifolia* foi gerada por meio da aplicação de 4 modelos estatísticos. O primeiro critério de seleção foi a avaliação da distribuição gráfica homogênea dos resíduos. O segundo critério foi o erro padrão da estimativa (Syx) e por último o  $R^2$ . As distribuições dos resíduos de todos os modelos testados são apresentados na Figura 24. O melhor modelo ajustado foi o de Schumacher Hall (modelo nº 3).

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS OBTIDOS A PARTIR DE EQUAÇÕES UTILIZADAS NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO PARA *Araucaria angustifolia*



FONTE: Elaborado pela autora

Os coeficientes resultantes dos ajustes desses modelos e a estatísticas de ajuste estão apresentados na Tabela 7.

TABELA 7 - ESTATÍSTICA DOS MODELOS AJUSTADOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA

ID	Modelo	$S_{yx}$	$S_{yx}$ (%)	$R^2$	$R^2$ aj
1	Spurr	180,92	37,41	0,96	0,96
2	Stoate	108,07	22,35	0,98	0,98
3	Schumacher Hall	209,87	43,40	0,95	0,95
4	-	48,72	235,59	0,93	0,93

FONTE: Elaborado pela autora

A partir dos resultados obtidos por meio das estatísticas para a qualidade do ajuste e distribuição gráfica dos resíduos, optou-se por utilizar o modelo 3, considerado o mais apropriado para aplicação neste estudo.

O ajuste do modelo 3 (Schumacher Hall) foi o que apresentou o resultado mais satisfatório, principalmente ao que se refere à dispersão gráfica dos resíduos.

Na Tabela 8 é apresentada a estatística descritiva das variáveis dap, h, v e AGB para os dados obtidos com o TLS e com o inventário florestal convencional.

TABELA 8 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL E COM O TLS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR

Inventário florestal convencional					Inventário florestal com TLS			
	dap (cm)	h (m)	V (m³)	AGB (kg)	dap (cm)	h (m)	V (m³)	AGB (kg)
<b>Média</b>	61,46	22,03	3,87	2384,62	59,92	21,72	3,16	2261,081
<b>Mínimo</b>	28,64	18,50	0,68	322,96	17,09	17,07	0,24	150,17
<b>Máximo</b>	88,80	24,00	7,69	5192,60	86,29	25,93	7,99	4453,811
<b>Desvio Padrão</b>	13,74	1,67	1,58	1052,24	14,08	2,00	1,56	1041,17
<b>CV (%)</b>	22,37	7,62	40,97	44,13	23,51	9,25	49,54	46,04

FONTE: Elaborado pela autora

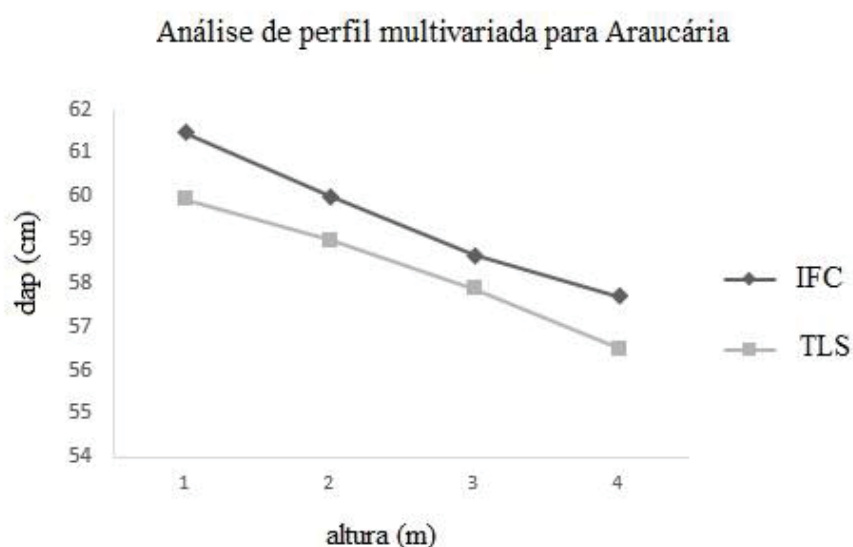
Os valores médios de dap, h, volume e biomassa acima do solo estimados pelo algoritmo TreeQSM foram subestimados em relação aos dados gerados pelo inventário florestal convencional, porém, ao aplicar-se o teste  $T^2$  de Hotteling, para amostras pareadas comprovou-se que não existe diferença

significativa entre as métricas geradas pelo modelo do inventário florestal convencional e o com TLS, portanto, aceita-se a hipótese  $H_0$ , considerando que a obtenção dos valores médios para as 4 variáveis simultaneamente não diferem entre si em relação a mensuração por TLS e cubagem em pé, não havendo diferença estatística significativa entre os métodos testados.

O valor de  $T^2$  de Hotelling (12.0146) é menor do que o valor tabelado de F (18.7148), aceita-se a hipótese da nulidade de que não há diferença nos resultados das medições das variáveis dendrométricas por meio do método convencional e LiDAR.

Na figura 25 está apresentado o perfil médio utilizado n teste de paralelismo realizado, o qual objetiva avaliar a diferença entre os diâmetros parciais obtidos por meio da tecnologia LiDAR e com o inventário florestal convencional.

FIGURA 25 - ANÁLISE DE PERFIL MULTIVARIADA PARA *Araucaria angustifolia*



FONTE: Elaborado pela autora

Os perfis médios de respostas correspondentes aos tratamentos são paralelos, coincidentes e o perfil não é constante ao longo do fuste, portanto, aceita-se as hipóteses  $H_0^{(1)}$  e  $H_0^{(2)}$ , no entanto, rejeita-se a hipótese  $H_0^{(3)}$ . As primeiras duas hipóteses revelam que não existe diferença nos valores médios

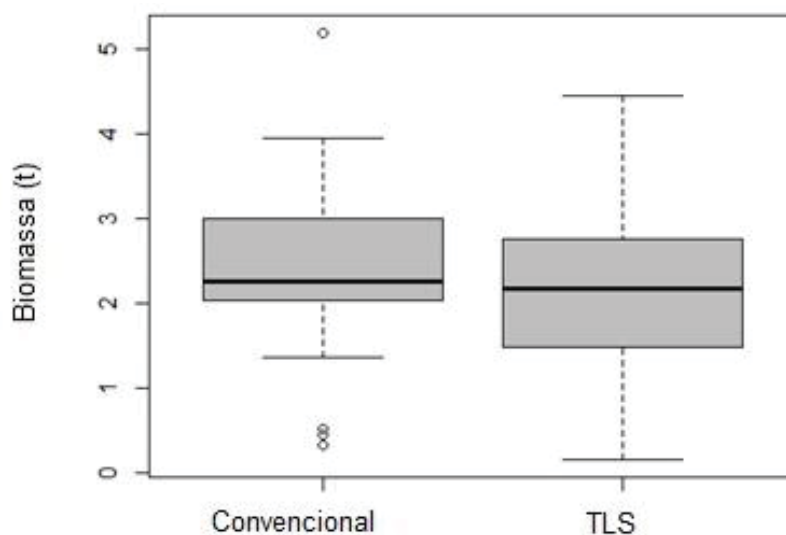
de di obtidos pelos dois métodos de medição. A terceira hipótese indica apenas que existe um afilamento no fuste.

Ruza (2019) aplicou o teste de paralelismo para comparar métricas obtidas com laser scanner terrestre (TLS) e inventário florestal convencional de *Eucalyptus benthamii*, os dados não apresentaram paralelismo, planicidade e o mesmo nível em suas curvas, ou seja, se diferem estatisticamente. A autora considera que, os resultados podem ser explicados pela dificuldade encontrada da visualização com clareza da base dos indivíduos durante a etapa de medição com o Criterion.

Os dados demonstrados nesse estudo não apresentam diferença estatística, porém, a altura máxima em comum para todas as árvores mensuradas em campo com o Criterion foi de 6m, devido à dificuldade de visualização do fuste das Araucárias, devido à influência da sobreposição da copa de árvores vizinhas.

Na Figura 26 está apresentado o gráfico de biomassa estimada pelos dois métodos (TLS e IFC).

FIGURA 26- DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE BIOMASSA ACIMA DO SOLO DE ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



FONTE: Elaborado pela autora

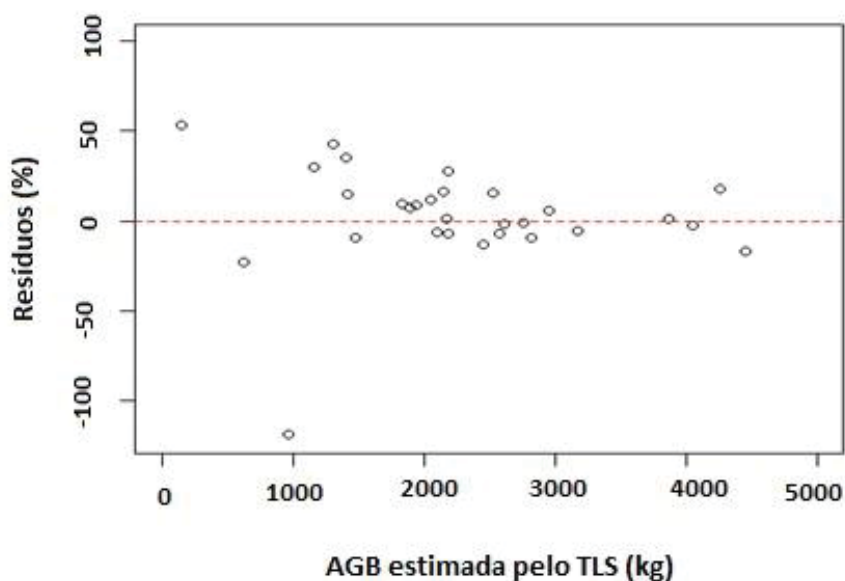


É possível visualizar que os dados obtidos com o TLS apresentam uma menor variância, e ainda, um menor número de *outliers* em relação ao inventário florestal convencional. Logo, destaca-se que o método utilizado pelo TLS é robusto, o que destaca o potencial do laser scanner terrestre para realizar estimativas acuradas de variáveis dendrométricas, consequentemente, de biomassa acima do solo.

A biomassa acima do solo estimada para *Araucaria angustifolia* apresentou uma alta variância, o que já era esperado, considerando que se trata de floresta nativa, onde os indivíduos apresentam uma grande variação em valores de diâmetro e altura. Por meio do TLS, identificou-se que o menor indivíduo de Araucária apresentava 150,17 kg de AGB e que o maior apresentava 4.453,811 kg de AGB, o que ressalta a alta variância apresentada nos dados.

O modelo utilizado para estimar AGB teve um menor ajuste para árvores com biomassa menor do que 1000 kgs, e ainda, para os indivíduos que apresentaram uma variação de 4000 a 5000 kgs de AGB. Na Figura 26 está apresentado o gráfico dos resíduos da AGB estimada pelo método TLS.

FIGURA 27- DISPERSÃO GRÁFICA DOS RESÍDUOS DA AGB ESTIMADA PELO TLS



FONTE: Elaborado pela autora

Em estudo realizado por Tanago (2017), as estimativas do AGB pelo método TLS-QSM mostraram a melhor concordância em comparação com medidas de colheita destrutivas apresentando uma correlação de 0,95. O TLS-QSM também apresentou o viés mais baixo (subestimação global de 3,7%) e estabilidade entre os tamanhos das árvores, contrastando com os modelos alométricos que mostraram um viés sistemático (subestimação geral variando de 15,2% a 35,7%) aumentando linearmente com o tamanho das árvores. O método TLS-QSM também forneceu estimativas precisas de volume de madeira, independentemente das características estruturais da árvore.

Ferraz et al. (2016), consideram que a caracterização de árvores de florestas tropicais utilizando o TLS tem sido limitada, apresentando grande incerteza na medição de árvores grandes com formas irregulares e outros atributos de tamanho, como altura total da árvore e tamanho da copa.

Disney et al. (2018), mencionam que os levantamentos florestais utilizando o TLS ainda são onerosos, considerando que todo esse processo depende do acesso a equipamentos caros, custos de implantação, poder de computação significativo e software potencialmente caros, de modo que, esses métodos estão fora do alcance de muitos pesquisadores. No entanto, espera-se que com o aumento do uso desse tipo de dado, os equipamentos laser apresentem um menor custo de aquisição.

Além disso, aumento da disponibilidade de dados de TLS de todos os tipos e técnicas de processamento automatizada estão levando ao desenvolvimento de novas ferramentas de software de código aberto. Tal fato, facilitará o acesso mais amplo à modelagem de TLS, além disso, se os protocolos de medição puderem ser padronizados, isso também aumentará a aceitação do TLS para o AGB e outras aplicações (DITTMANN et al., 2017; DISNEY et al., 2018).

#### 4.6 Conclusões

A mensuração de variáveis dendrométricas da *Araucaria angustifolia* utilizando o TLS, apresentaram um bom desempenho quando comparados com dados de inventário florestal convencional, não havendo diferença estatística significativa entre os métodos. O TLS pode ser considerado uma tecnologia apropriada para mensurações em florestas nativas, de modo que, recomenda-se que seja realizado um planejamento de campo detalhado, de modo a avaliar a distribuição do laser entre os pontos da parcela, visando evitar a oclusão de árvores, e principalmente, do sub-bosque, considerando tratar-se de uma área com grande densidade de indivíduos.

A automatização do processamento de dados, como é o caso do algoritmo TreeQsm foi considerada eficaz, tendo em vista que evitou possíveis erros do usuário na manipulação manual de softwares, e ainda, otimiza a modelagem e mensuração dos dados.

Portanto, conclui-se que o laser scanner terrestre aliado aos modelos de estrutura quantitativa são considerados uma ferramenta de grande potencial para estimar AGB em florestas nativas, tendo em vista que possibilita uma alta acurácia na modelagem de árvores individuais.

## **5 CAPÍTULO IV: Análise da acurácia da redução da densidade da nuvem de pontos TLS para estimativa de variáveis florestais a nível de árvore individual**

### **RESUMO**

O presente capítulo objetiva avaliar se a redução da densidade da nuvem de pontos TLS em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista, permite que a acurácia da altura e dap seja mantida, no intuito de otimizar o tempo de processamento de dados. Foram testados três tipos de reamostragem dos dados, sendo: baseada em octree, espacial e aleatória. No método octree, não foi possível aplicar o algoritmo TreeQSM, responsável pela modelagem tridimensional da árvore e mensuração do dap e altura. O método aleatório manteve-se 75%, 50%, 25%, 20%, 15%, 10% e 5% em relação à nuvem de pontos original, enquanto que no método espacial estabeleceu-se os valores de 0,075, 0,050, 0,025 e 0,010. Após a redução, aplicou-se o algoritmo TreeQSM no intuito de avaliar se as árvores haviam apresentado perda estrutural e se ainda seria possível realizar as estimativas volumétricas. O método octree não apresentou resultados satisfatórios, tendo em vista que se tornou inviável processar o algoritmo, ocasionando em alteração estrutural da nuvem de pontos. Para os demais métodos, após as estimativas geradas pelo TreeQSM aplicou-se o Teste  $T^2$  de Hotelling para avaliar se havia diferença significativa entre os modelos utilizando as variáveis altura e dap. Os valores médios para as duas variáveis não apresentaram diferença estatística a nível de 99% de significância. Considera-se que o uso de uma menor densidade de pontos contribui para a maior acessibilidade de dados LiDAR, indicando que levantamentos com menores densidades de pontos tem um menor custo de aquisição.

Palavras-chave: Reamostragem, LiDAR, Volumetria, Floresta Ombrófila Mista.

## **CHAPTER IV: Analysis of the accuracy of reducing the density of the TLS point cloud to estimate forest variables at the individual tree level**

### **ABSTRACT**

This chapter aims to evaluate whether the reduction of the density of the TLS point cloud in a Mixed Rain Forest Fragment, allows the accuracy to be maintained, in order to optimize the data processing time. Three types of data resampling were tested, being: octree based, spatial and random. In the octree method, it was not possible to apply the TreeQSM algorithm, responsible for the three-dimensional modeling of the tree and measurement of dap and height. The random method remained 75%, 50%, 25%, 20%, 15%, 10% and 5% in relation to the original point cloud, while in the spatial method the values of 0.075, 0.050, 0.025 and 0.010. After the reduction, the TreeQSM algorithm was applied in order to evaluate if the trees had presented structural loss and if it would still be possible to perform volumetric estimates. The octree method did not present satisfactory results, considering that it became impracticable to run the algorithm, causing structural changes in the point cloud. For the other methods, after the estimates generated by the TreeQSM, Hotelling's  $T^2$  Test was applied to assess whether there was a significant difference between the models using the height and dbh. The data showed no statistical difference at 99% significance level. It is considered that the use of a lower density of points contributes to greater accessibility of LiDAR data, considering that surveys with lower density of points have a lower acquisition cost.

**Keywords:** Resampling, LiDAR, Volumetry, Mixed Ombrophilous Forest.

## 5.1 Introdução

De acordo com Putman et al. (2018), os lasers scanner terrestres (TLS), são capazes de produzir nuvens de pontos muito densas a nível de árvores individuais e têm a vantagem de poder realizar varreduras sob diversos ângulos em uma área de estudo, caracterizando os detalhes de uma árvore inteira em termos de estrutura, tamanho e orientação do fuste e ramos, que são consideradas difíceis de medir usando outras plataformas ou abordagens tradicionais de medição.

O TLS tem sido utilizado em uma ampla variedade de aplicações florestais e recentemente tem sido utilizado com o objetivo de reconstruir modelos 3D sólidos de árvores individuais, permitindo estimativas precisas e não destrutivas de volume e biomassa. Embora essa seja uma aplicação relativamente nova do TLS, os algoritmos apresentados na literatura podem ser agrupados em duas abordagens comuns: sendo, referentes ao ajuste de primitivas geométricas, como cilindros circulares (RAUMONEN et al., 2013; CALDERS et al., 2015), a nuvens de pontos em uma representação baseada em voxels (BIENERT, 2014; VONDERACH et al., 2012).

Os conjuntos de dados TLS podem conter milhões ou até bilhões de pontos, de modo que, pode ser muito difícil processar ou analisar cada ponto individualmente, tanto computacionalmente quanto na prática. A nuvem de pontos precisa ser discretizada em recursos ou formas mais simples com base em atributos comuns para suportar processamento e análises adicionais. Muitas abordagens de segmentação foram desenvolvidas e testadas em dados de laser scanner aéreo (ALS), embora algumas técnicas possam ser aplicadas ou facilmente adaptadas aos dados de TLS (GRILLI et al., 2017), considera-se que o TLS possui diferenças notáveis em relação ao ALS, bem como, características como ângulos de visão, resolução espacial e aplicabilidade para uma área de interesse. Geralmente, um objeto é varrido pelo TLS de várias posições de varredura adjacentes, enquanto o ALS varre um objeto apenas no sentido de cima para baixo (CHE e OLSEN, 2018).

Avanços nessa tecnologia resultaram em densidades de pontos extremamente altas e melhores precisões de dados, acompanhadas por desafios para a aquisição e manipulação de dados. O processamento

de nuvens com uma grande densidade de pontos envolve uma série de desafios, desde gerenciamento de dados até remoção de ruído, compressão de modelos e visualização interativa. Além disso, ao mesclar diversas verificações, o tamanho da nuvem resultante cresce rapidamente, dificultando o gerenciamento em termos de recursos (COMINO et al., 2017). Uma maneira comum de lidar com os dados é processar apenas um pequeno subconjunto deles. Embora esta seja uma maneira aceitável de manipular os dados para algumas aplicações, questiona-se por que tantas medições foram adquiridas em primeiro lugar (ELSEBERG et al., 2013). Logo, a redução da densidade de pontos reduz os custos de aquisição de dados e supera os desafios computacionais para avaliações florestais em grandes áreas (SINGH et al., 2015).

Apesar do crescente interesse e exemplos bem-sucedidos de modelagem de árvores utilizando o TLS, o que se refere a análise da redução de pontos para árvores individuais e da acurácia e perda estrutural em particular, não foi totalmente testado na literatura, principalmente ao que se refere à aplicabilidade em floresta nativa. Diante disso, destaca-se a importância de avaliar a acurácia da densidade de pontos na modelagem de árvores individuais.

## 5.2 Objetivos

### 5.2.1 Objetivo geral

O presente estudo objetiva avaliar se a redução da densidade de pontos em dados TLS poderá resultar em perdas estruturais ao modelar atributos florestais a nível de árvore.

### 5.2.2 Objetivos específicos

- Testar a influência da densidade de nuvem de pontos TLS para estimativa de atributos a nível de árvore, avaliando a perda estrutural de elementos.

- Avaliar a acurácia entre os métodos testados.



### 5.3 Hipóteses

A redução da densidade da nuvem de pontos TLS em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista, permite que a acurácia seja mantida e otimiza tempo de processamento de dados.

## 5.4 Material e métodos

### 5.4.1 Aquisição dos dados TLS

Os dados utilizados foram provenientes do levantamento realizado com o laser scanner terrestre (TLS), detalhado no Capítulo 2. Esse capítulo apresenta todas as informações sobre a área de estudo e técnicas utilizadas para processamento dos dados.

### 5.4.2 Reamostragem dos dados

Foram testados três métodos de amostragem semiautomatizada, realizado pelo software *cloudcompare*, sendo: baseado em octree, espacial e aleatória. Para cada nuvem de entrada, uma nova nuvem subamostrada foi criada, de modo que, a nuvem de pontos base foi desativada. A nuvem de pontos base foi considerada como testemunha, os quais os métodos testados foram comparados.

A nuvem base representa a nuvem de pontos original, sem nenhum tipo de redução ou manipulação nos pontos quantitativamente. Para esse estudo, utilizou-se a configuração de 488.000 pontos/segundo, com um erro de variação de  $\pm 2\text{mm}$ , com uma varredura vertical de 5.820 rpm ou 97 Hz.

A nuvem subamostrada é um subconjunto da nuvem de entrada (os pontos originais não são deslocados), ou seja, mantém-se os mesmos dados, de modo

que, uma nuvem subamostrada mantém os recursos de sua nuvem de origem (campos escalares, cores, normais, etc.).

O método 'octree', permite selecionar um nível de subdivisão de “células” em que a nuvem será 'simplificada'. Em cada célula da octree, o ponto mais próximo do centro da célula octree é mantido, quanto maior o nível, menor a quantidade de células (assim, mais pontos são mantidos). Esse método baseia-se em estruturas de voxels.

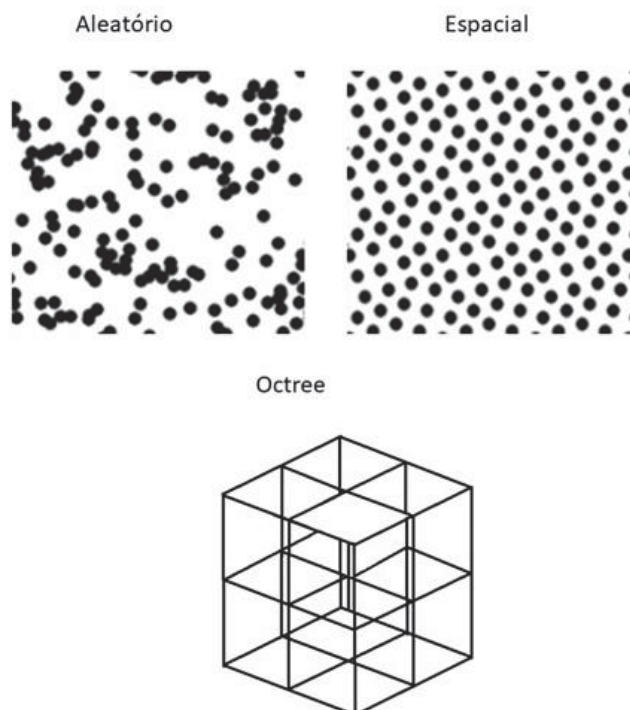
No modo 'espacial', foi necessário estabelecer uma distância mínima entre dois pontos. O *CloudCompare* seleciona os pontos da nuvem original para que nenhum ponto na nuvem de saída esteja mais próximo de outro ponto que tenha o valor especificado. Quanto maior for esse valor, menos pontos serão mantidos, em vez de especificar um único valor para o modo de subamostragem espacial, o usuário pode usar o campo escalar para modular a distância de amostragem com os valores escalares. O usuário deve especificar a distância de amostragem correspondente aos valores escalares mínimo e máximo e o software irá interpolar linearmente a distância espacial. Para esse estudo foram testados a distância mínima entre pontos de 0,075, 0,050, 0,025 e 0,010.

No modo 'aleatório' o software *CloudCompare* escolhe os pontos de forma aleatória, não sendo estabelecido nenhum tipo de critério para a reamostragem além da densidade de pontos desejada. Nesse caso, mantiveram-se apenas os seguintes valores 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 50% e 75% em relação à nuvem de pontos original (testemunha), de modo que, a degradação mínima representa o menor valor possível testado até que seja inviável realizar o processamento da árvore.

A ferramenta *Resample* calcula o centro de gravidade dos pontos que caem em cada célula (ou seja, a nuvem criada não é um subconjunto da nuvem original), por exemplo, se a nuvem estiver associada a um campo escalar de "curvatura", é possível configurar o software para que sejam testados mais pontos em áreas curvilíneas e menos pontos em áreas planas.

Na Figura 28 está representado cada tipo de reamostragem que foi realizada.

FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DOS TIPOS DE REAMOSTRAGEM REALIZADAS



FONTE: Elaborado pela autora

Todos os modelos testados no software *cloudcompare* utilizaram a ferramenta escalar de curvatura, pois, considera-se que não se está modelando um objeto de forma geométrica, como por exemplo um círculo, ou um cubo, portanto, deve-se considerar as variações de curvatura, como por exemplo o afilamento do fuste e tortuosidade de galhos e folhas.

#### 5.4.3 Estimativa de h e dap dos dados reamostrados

A partir da reamostragem dos dados, foi aplicado o algoritmo TreeQSM, conforme o funcionamento está detalhado no capítulo anterior, no intuito de comparar os dados obtidos na reamostragem. O método testado só foi considerado satisfatório, quando 100% das árvores possibilitaram a aplicação do algoritmo de modelagem 3D, vale ressaltar que a comparação com os dados

obtidos em campo foi realizada no capítulo anterior, levando em consideração a nuvem de pontos base (testemunha).

Além disso, os valores de altura e dap foram mensurados manualmente por meio do software Recap, disponibilizado gratuitamente para uso acadêmico por trinta dias.

#### 5.4.4 Análise estatística dos modelos testados

Inicialmente, realizou-se o uso dos testes de viés, Precisão e acurácia, comparando os dados reamostrados com a testemunha (nuvem de pontos que não foi reamostrada).

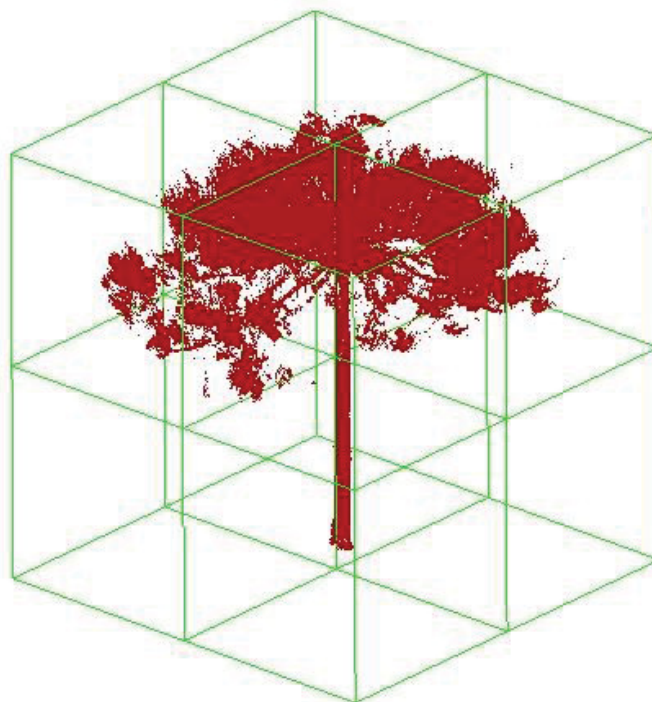
Além disso, foi utilizado o teste  $T^2$  de Hotelling para avaliar a diferença estatística entre amostras pareadas, considerando os valores de altura e dap simultaneamente. Todos as reamostragens foram comparadas em relação à testemunha, ou seja, com a nuvem de pontos que não foi reamostrada. As variáveis utilizadas para validar a reamostragem foram dap e altura.

O Teste  $T^2$  de Hotelling foi aplicado somente nos conjuntos de dados reamostrados em que não ocorreu a perda estrutural de nenhuma das árvores testadas, ou ainda, em que os valores estimados pelo algoritmo TreeQSM não foram muito distintos dos valores base (nuvem de pontos testemunha). O conjunto de dados que apresentou perda estrutural de alguma árvore, ou não foi possível rodar o TreeQSM, foi descartado na aplicação do Teste  $T^2$  de Hotteling, considerando o método como ineficiente para esse estudo.

## 5.5 Resultados e discussão

No processamento de dados LiDAR, o número de pontos do laser scanner terrestre é geralmente maior do que o necessário para análise, portanto, o processo de voxelização é um passo comum antes de derivar os atributos das árvores. Na Figura 29 está representada a reamostragem realizada pelo método octree com 18 voxels.

FIGURA 28 - REPRESENTAÇÃO DA REDUÇÃO DA DENSIDADE DE PONTOS POR MEIO DO MÉTODO OCTREE, EXEMPLIFICADO COM 18 VOXELS



FONTE: Elaborado pela autora

Um voxel é definido como um elemento de volume em uma matriz 3D, sendo que, todos os pontos dentro do conjunto de dados registrados podem ser atribuídos aos voxels correspondentes (HOSOI e OMASA, 2006). Dessa forma, as informações dos dez a cem pontos em um voxel podem ser substituídas atribuindo apenas seu valor médio aos atributos de voxel (ELSEBERG et al., 2013).

Nesse estudo, um dos métodos testados foi baseado em octree, porém ao aplicar o algoritmo TreeQSM não se obteve resultados satisfatórios, pois, as árvores impossibilitaram a aplicação do algoritmo TreeQSM. Ao realizar a medição manual utilizando o software Recap, foi possível visualizar que os valores manuais foram mantidos, de modo que, permitiu-se a obtenção dos valores de dap e altura manualmente.

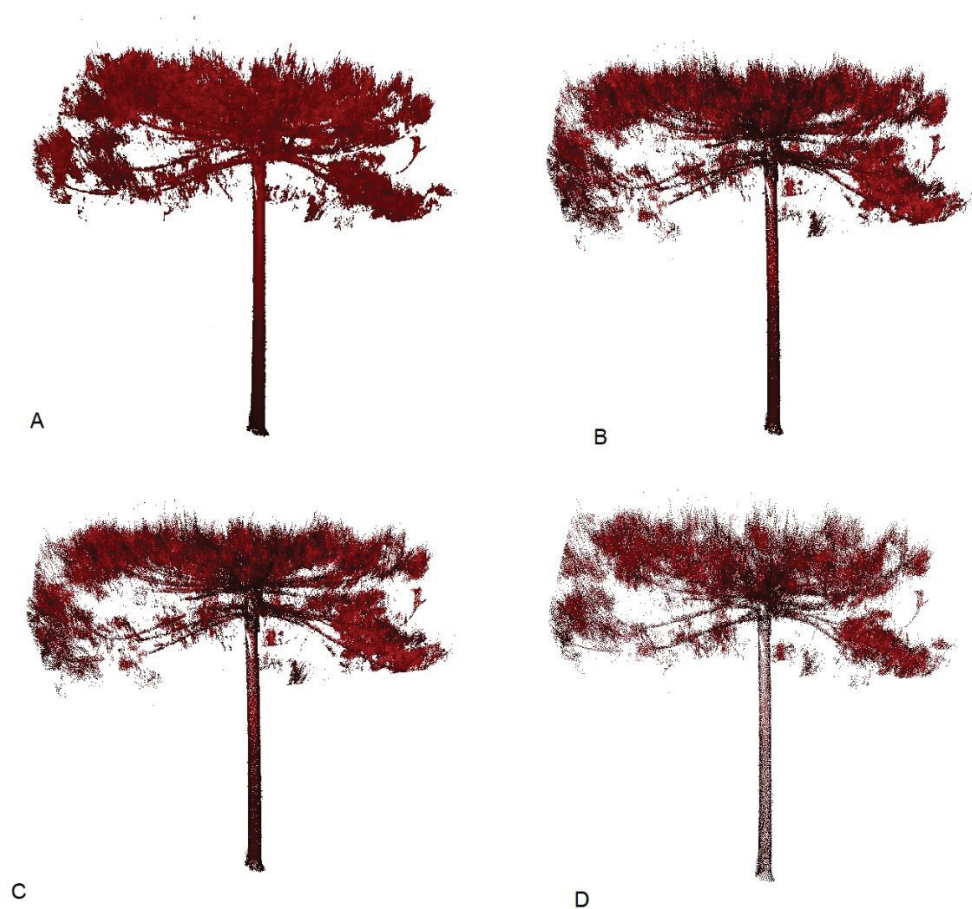
Diante disso, para esse estudo foram desconsideradas as reamostragens utilizando o método octree, tendo em vista que, uma das principais ferramentas utilizadas foi o algoritmo TreeQSM. Para que fosse possível utilizar a reamostragem por meio de voxels, deveriam ser testados outros algoritmos para realizar a modelagem tridimensional da árvore e geração das variáveis dendrométricas. Embora os valores de dap e altura tenham sido mantidos nas medições com o software Recap, o processo é considerado manual, o que inviabiliza a aplicação em grandes áreas ou em um grande número de indivíduos.

Na maioria dos algoritmos, os conjuntos de pontos são suavizados de acordo com as informações da superfície local, de modo que, são utilizados métodos de mínimos quadrados para descrever a geometria local, preservando as arestas e formas dos objetos (DESCHAUD e GOULETTE, 2010, LI e SUN, 2018). Deve-se considerar sempre que é necessário manter a qualidade da nuvem de pontos sem alterar as características da base de pontos originais, evitando perdas estruturais do objeto.

Quanto ao método de reamostragem espacial, os valores testados foram de 0,075, 0,050, 0,025 e 0,010. Ao aplicar o algoritmo TreeQSM nas árvores reamostradas, a nuvem de pontos com a distância de 0,075 entre os pontos foi a única que sofreu alteração estrutural, impossibilitando a modelagem 3D da árvore. Para esse conjunto de dados, treze árvores não possibilitaram a aplicação do algoritmo.

Na Figura 30 está representado o método espacial testado com as reamostragens que apresentaram resultados satisfatórios.

FIGURA 29- REPRESENTAÇÃO DA REDUÇÃO DA DENSIDADE DE PONTOS PELO MÉTODO ESPACIAL A) TESTEMUNHA B) 0,050 C) 0,025 D) 0,010



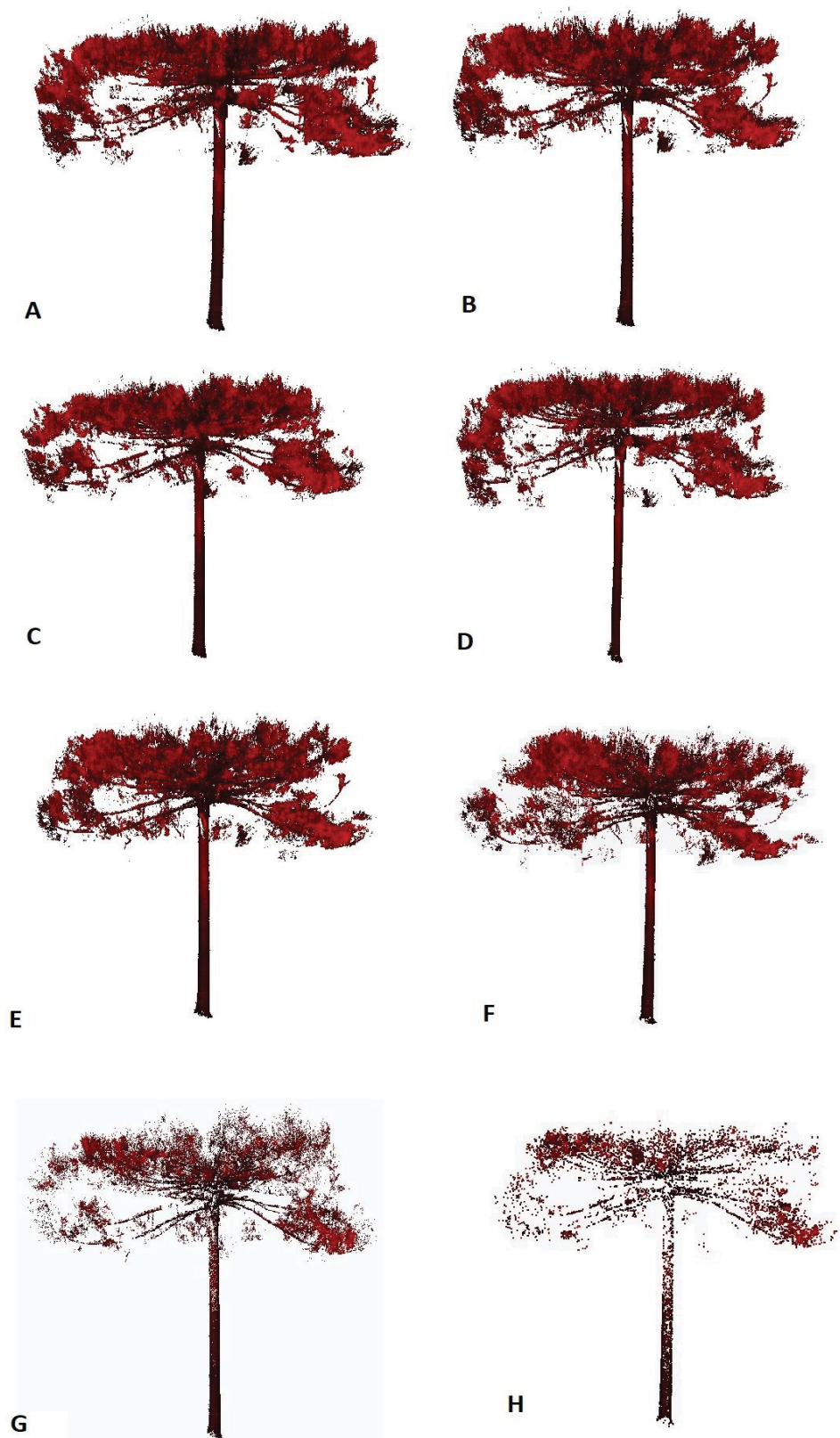
FONTE: Elaborado pela autora

Quanto ao método aleatório, foram testados os valores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 50% e 75% em relação à testemunha. Ao rodar o algoritmo TreeQSM para a nuvem com 5%, dezessete árvores impossibilitaram a aplicação do algoritmo, para 10% foram sete árvores sem resultados e com 15% apenas uma árvore. Em função disso, apenas as reamostragens que mantiveram 100% das árvores foram consideradas. Assim como no método octree, visualmente todas as reamostragens não apresentaram perda estrutural da árvore, porém, considerou-se apenas as árvores em que foi possível aplicar o TreeQSM.

Na Figura 31 está apresentado a representação visual da reamostragem da nuvem de pontos do método aleatório, de modo que, percebe-se que não ocorreu perda estrutural para os dados testados nesse estudo.



FIGURA 30 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO ALEATÓRIO PARA A REDUÇÃO DA DENSIDADE DE PONTOS A) TESTEMUNHA B) 75% C) 50% D) 25% E) 20% F) 15% G) 10% H) 5%



FONTE: Elaborado pela autora

Na Tabela 9 está estatística descritiva dos modelos testados, onde estão apresentados os valores obtidos para a testemunha e todos os modelos considerados satisfatórios, para variável dap.

TABELA 9 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MODELOS TESTADOS PARA REAMOSTRAGEM DO DAP (CM) DAS ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR

Variável	Testemunha	E1	E2	E3	A1	A2	A3	A4
<b>Média</b>	58,59	58,73	59,38	58,68	58,70	59,38	58,77	58,78
<b>Máximo</b>	86,29	86,4	86,5	85,4	86,5	86,5	85,4	86,4
<b>Mínimo</b>	17,09	17,09	17,12	17,1	17,09	17,12	17,1	17,09
<b>Variância</b>	244,54	240,70	243,70	238,94	241,01	243,70	241,88	239,38
<b>Desvio padrão</b>	15,63	15,51	15,61	15,45	15,52	15,61	15,55	15,47
<b>Amplitude</b>	69,2	69,31	69,38	68,3	69,41	69,38	68,3	69,31

Onde: E1 – método espacial com 0,050; E2 – método espacial com 0,025; E3 – método espacial com 0,010; A1 – método aleatório com 20%, A2 – método aleatório com 25% ; A3 – método aleatório com 50%; A4 método aleatório com 75%.

FONTE: Elaborado pela autora

Na Tabela 10 está apresentada a estatística descritiva dos modelos aprovados em relação à altura (m).

TABELA 10 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS MODELOS TESTADOS PARA REAMOSTRAGEM DA ALTURA (m) DE ÁRVORES AMOSTRADAS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR

Variável	Testemunha	E1	E2	E3	A1	A2	A3	A4
<b>Média</b>	21,80	21,87	21,85	21,87	21,76	21,87	21,88	21,76
<b>Máximo</b>	25,93	25,63	25,63	25,63	25,63	25,63	25,63	25,63
<b>Mínimo</b>	17,07	17,45	17,65	17,45	17,56	17,65	17,45	17,56
<b>Variância</b>	4,10	3,60	3,505	3,60	3,44	3,44	3,62	3,444
<b>Desvio padrão</b>	2,02	1,89	1,87	1,89	1,85	1,85	1,90	1,855
<b>Amplitude</b>	8,86	8,18	7,98	8,18	8,07	7,98	8,18	8,07

Onde: E1 – método espacial com 0,050; E2 – método espacial com 0,025; E3 – método espacial com 0,010; A1 – método aleatório com 20%, A2 – método aleatório com 25%; A3 – método aleatório com 50%; A4 método aleatório com 75%.

FONTE: Elaborado pela autora

Na Tabela 11 estão apresentados os valores de viés, precisão e acurácia para os sete métodos apresentados, todos calculados em relação à testemunha.

TABELA 11 - VALORES DE VIÉS (%), PRECISÃO (%) E ACURÁCIA (%) PARA OS MODELOS DE REAMOSTRAGEM TESTADOS

	E1	E2	E3	A1	A2	A3	A4
<b>Viés (%)</b>	-0,23	-1,33	-0,15	-0,18	-1,33	-0,29	-0,31
<b>Precisão (%)</b>	1,91	3,94	1,94	1,95	3,93	2,00	1,92
<b>Acurácia (%)</b>	1,92	4,15	1,94	1,96	4,15	2,02	1,94

Onde:

*E1 – método espacial com 0,050; E2 – método espacial com 0,025; E3 – método espacial com 0,010; A1 – método aleatório com 20%, A2 – método aleatório com 25% ; A3 – método aleatório com 50%; A4 método aleatório com 75%.*

FONTE: Elaborado pela autora

Mikhail e Achermann (1976), consideram que, a acurácia reflete a proximidade de uma grandeza estatística ao valor do parâmetro para o qual foi estimada e que a precisão está diretamente ligada com a dispersão da distribuição das observações. De modo geral, o viés e a precisão combinados definem a performance de um estimador, sendo que quanto maior o viés, menos preciso o estimador é e menor é sua capacidade de estimar acuradamente um ponto (WALTHER & MOORE, 2005). Acurácia é definida como a distância entre valores estimados e os valores reais.

Os modelos testados para diâmetro e altura apresentaram valores muito próximos da testemunha, logo, evidencia-se que, apesar de reduzida a nuvem de pontos, não se obteve muita variação nos resultados gerados pelo TreeQSM. Ao aplicar o teste  $T^2$  de Hotelling foi possível confirmar que não existe diferença estatística significativa entre os valores médios das variáveis, ao comparar os métodos em relação à testemunha.

Na Tabela 12 está apresentado os resultados obtidos para o teste  $T^2$  de Hotelling aplicado.

TABELA 12 - TESTE  $T^2$  DE HOTELLING APLICADO AOS MODELOS EM RELAÇÃO A TESTEMUNHA

Teste $T^2$ de Hotelling	
E1 = 4,0232	A4 = 4,0235
E2 = 0,6746	A5 = 1,4629
E3 = 2,7337	A6 = 3,8859
	A4 = 3,8859

FONTE: Elaborado pela autora.

O valor de  $T^2$  de Hotelling para todos os modelos testados é menor do que o valor tabelado de F (11,3828), aceita-se a hipótese da nulidade de que não há diferença na mensuração das variáveis dap e h obtidas por diferentes intensidades de amostragem.

Portanto, considera-se que a remostragem, da nuvem de pontos pelos métodos aleatório e espacial não influenciou na acurácia dos resultados gerados para altura e dap.

Ao realizar-se a redução da densidade de pontos, deve-se considerar sempre o objetivo do produto final, se existe a necessidade de um alto detalhamento estrutural, como por exemplo, estimativas de florestas que caracterizem o índice de área foliar, ou angulação de folhas. Porém, ao se realizar a reamostragem de pontos TLS, deve-se cuidar para não haver perda estrutural da árvore, principalmente em pontos que possa ter ocorrido algum tipo de oclusão na nuvem de pontos base.

Alguns autores consideram que uma nuvem de pontos de alta qualidade é aquela que tem uma densidade de pontos muito alta e uma baixa taxa de oclusão, enquanto uma nuvem de pontos de baixa qualidade seria exatamente o oposto (PUTMAN, 2018). Porém, trabalhar com nuvens de alta qualidade demanda um maior tempo de processamento de dados, software e hardware compatíveis, e principalmente, investimento de recurso financeiro.

Na maior parte dos processos de redução de pontos, os conjuntos de dados são suavizados de acordo com os recursos da superfície local. Na maioria dos algoritmos de redução de pontos, os conjuntos de pontos são suavizados de acordo com os recursos da superfície local.

De acordo com Tesfamichael et al. (2018), a decisão de selecionar uma densidade pontual específica, deve estar diretamente relacionada por um nível de precisão aceitável e pelo custo da pesquisa. Os levantamentos LiDAR são geralmente caros (HUMMEL et al., 2011; BRUSA e BUNKER, 2014) e são influenciados pela resolução espacial (densidade de pontos), entre outros fatores. De modo que, acurácias alcançadas usando densidades mais baixas, são igualmente eficientes de acordo com o objetivo aplicado.

Estudos utilizando dados ALS já consolidaram que densidades de pulso menores são recomendados, porque muitas vezes possibilitam campanhas de voo que permitem reduções de custo significativas e volumes de dados reduzidos (HANSEN et al., 2015). No entanto, a densidade reduzida também implica um nível reduzido de detalhes capturados da área escaneada (PEARSE et al., 2019).

Silva et al. (2017), testaram o efeito da densidade de pontos LiDAR na predição da altura em plantações de *Pinus taeda* L. utilizando dados ALS e concluíram que a redução de 100% para 80%, 60%, 40%, 20%, 10%, 5% e 1% apresentaram RMSE inferiores a 10%, o qual foi considerado baixo, não influenciando na predição necessária. Diversas pesquisas têm avaliado a influência sobre o impacto da densidade de pulso na precisão da caracterização da floresta e do terreno, principalmente através da simulação de densidades mais baixas após uma captura inicial de alta densidade (HANSEN et al., 2015; WILKES et al., 2015).

Jabukowski et al. (2013), consideram que à medida que a tecnologia LiDAR tem melhorado, tem havido uma tendência para adquirir dados em densidades cada vez maiores, no intuito de que isso melhorará as precisões. Porém, ao testarem alguns algoritmos para avaliar a influência da densidade de pontos ALS, concluíram que a precisão das métricas da estrutura florestal prevista, diminui à medida que a densidade de pulsos diminui, mas permanece relativamente alta até baixas densidades (por exemplo, 5 pt/ m<sup>2</sup>).

Diante disso, considera-se que é possível perceber que os resultados demonstram que é possível obter dados com densidade de pontos reduzida durante a realização do levantamento TLS.

## 5.6 Conclusões

A reamostragem dos dados TLS para árvores individuais foi considerada apropriada, de modo que, as nuvens de pontos reclassificadas, inclusive as com a menor densidade de pontos, foram capazes de gerar estimativas de altura e diâmetro a altura do peito de forma acurada. Considera-se que, o uso de uma menor densidade de pontos contribui para a maior acessibilidade de dados LiDAR, vale ressaltar que, levantamentos com menores densidades de pontos têm um menor custo de aquisição.

Portanto, os resultados obtidos por este estudo representam um bom ponto de partida para medir a estrutura da floresta a partir de nuvens de pontos 3D obtidas com TLS, considerando que a densidade de pontos reduzida facilita a manipulação pelo usuário, como também, exige um menor suporte computacional e de tempo de processamento de dados.

## **6 CAPÍTULO V: Integração de dados Laser scanner aéreo (ALS) e Laser scanner terrestre (TLS) para a geração de estimativas de biomassa acima do solo para *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze**

### **RESUMO**

O TLS apresenta um grande detalhamento da floresta, porém, limita-se a aplicação em grandes áreas, e o ALS apresenta uma menor riqueza de detalhes, porém, é aplicado para grandes áreas. Diante disso, o objetivo desse estudo foi integrar dados ALS e TLS para gerar estimativas de biomassa acima do solo (AGB) para *Araucaria angustifolia*, obtido em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista urbana no município de Curitiba - PR. O estudo foi composto por três diferentes cenários, sendo ALS, TLS e integração de dados ALS e TLS. O método baseou-se em: obtenção dos relatórios descritivos das nuvens, filtragem de pontos e geração dos modelos digitais. Realizou-se a normalização das alturas e geração do modelo de altura de copa (CHM), para segmentação das copas no cenário utilizando o ALS. Foi utilizada uma abordagem orientada a objeto, sendo testado uma série de valores para a segmentação das copas e individualização. Quanto ao cenário do TLS realizou-se a segmentação das Araucárias, filtragem e aplicação do algoritmo TreeQSM. E por último, realizou-se a integração dos dados ALS e TLS, por meio do software cloudcompare, de modo que, as nuvens foram integradas pela área de copa. A área de copa gerada pelo TLS apresentou uma subestimativa, apresentou  $r = 0,72$  com o dap, enquanto os dados ALS apresentaram  $r = 0,81$  e a integração  $r = 0,80$ . A AGB estimada pela integração do TLS e ALS foi de 369,70 kg a 4128,35 kg por árvore. Quando comparados com os dados de campo, os dados da integração apresentaram um viés de 2,17%, precisão de 11,83 % e acurácia de 12,03%. A integração de dados ALS e TLS indicou uma maior acurácia dos dados, propiciando um maior detalhamento do dossel florestal.

Palavras-chave: LiDAR, Sensoriamento Remoto, Inventário florestal, Área de copa.



## **CHAPTER V: Integration of LAS and TLS data for above-ground biomass estimates for *Araucaria angustifolia***

### **ABSTRACT**

TLS presents a great detail of the forest, however, it is limited to application in large areas, and ALS presents a lesser of details, however, it is applied to large areas. Therefore, the aim of this study was to integrate LAS and TLS data to generate above-ground biomass (AGB) estimates for *Araucaria angustifolia*. The study consists of three different scenarios, being LAS, TLS and data integration ALS and TLS. The methodology was based on: obtaining descriptive reports of clouds, filtering points and generation of digital models. The height standardization and the generation of the crown height model (CHM) were performed, for segmentation of the crowns in the scenario using LAS. An object-oriented approach was used, with a series of values being tested for the segmentation of the glasses and individualization. As for the TLS scenario, *Araucarias* segmentation, filtering and application of the TreeQSM algorithm were performed. And finally, the integration of LAS and TLS data was performed, using the cloudcompare software, so that the clouds could be integrated by the canopy area. The canopy area generated by TLS was underestimated, showing  $r = 0.72$  with dap, while LAS data showed  $r = 0.81$  and integration  $r = 0.80$ . The AGB estimated by the integration of TLS and LAS was from 369.70 kg to 4128.35 kg per tree. When compared with the field data, the integration data showed a 2.17% bias, 11.83% accuracy and 12.03% accuracy. The integration of LAS and TLS data provided greater accuracy of the data, providing greater details of the forest canopy.

**Keywords:** LiDAR, Remote Sensing, Forest inventory, Crown area.

## 6.1 Introdução

A integração de dados LiDAR no setor florestal é uma tendência, tendo em vista que a tecnologia TLS é muito precisa e rápida, mas considerada limitada a áreas relativamente pequenas como parcelas de inventários florestais. A tecnologia ALS é mais focada na coleta de dados em grandes áreas. Ambas tecnologias são complementares, portanto, são necessárias as duas fontes de informação para aumentar a acurácia das variáveis de árvore e ampliar os resultados para grandes áreas com modelos estatísticos (WEZIK, 2012).

O ALS e TLS apresentam perspectivas diferentes, de modo que, o laser terrestre apresenta uma abrangência de baixo para cima, e mais frequente, variando a posição angular. Como são mais propensos a produzir um retorno mensurável (distribuição de Poisson), as distribuições de nuvens de pontos são obtidas de observações transportadas pelo ar, portanto, inclinadas para o topo do dossel, enquanto aquelas adquiridas do TLS são inclinadas em direção à parte inferior da árvore.

Quanto ao laser scanner aéreo, considera-se que uma das grandes vantagens de se usar o equipamento transportado pelo ar em ambientes florestais é a capacidade de os pulsos de laser individuais explorarem as lacunas na vegetação para alcançar a vegetação de sub-bosque e, assim, facilitar a caracterização estrutural dos mesmos. No entanto, quando se refere a florestas nativas do Brasil, à medida que a densidade da vegetação aumenta, o tamanho e o número dessas lacunas diminuem. Consequentemente, foi reconhecido por vários autores que as copas mais densas reduzem a capacidade de caracterizar com precisão a vegetação do sub-bosque (CAMPBELL et al., 2018).

Diversos trabalhos sugerem a utilização de sistemas ALS, VANT's e TLS como abordagens complementares, uma vez que dados florestais locais, coletados por meio de TLS, podem ser usados como referência para a calibração de dados de inventário de grandes áreas medidos por meio de ALS ou até mesmo dados obtidos com VANTs (FERRARA et al., 2018, GAGO et al., 2015).

O LiDAR pode ser considerado um dos melhores métodos para levantamento da estrutura vertical da floresta, é considerado uma das técnicas de Sensoriamento Remoto de última geração, devido ao grande potencial para uso em inventários florestais (GUO et al., 2017; WANG et al. 2020). Nos últimos vinte anos, a tecnologia LiDAR mudou fundamentalmente a maneira como se observa e descreve a estrutura da floresta, e continuará a impactar monitoramentos e pesquisas sobre a estrutura e funções da floresta (BELAND et al., 2019).

## 6.2 Objetivos

### 6.2.1 Objetivo geral

- Realizar a integração de dados ALS e TLS de um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista para estimar a biomassa acima do solo (AGB) para a *Araucaria angustifolia*.

### 6.2.2 Objetivos específicos

- Integrar dados de ALS e TLS para gerar estimativas de AGB para *Araucaria angustifolia* em um Fragmento de Floresta Ombrófila Mista;
- Gerar modelos estatísticos e correlacionar com a técnica de inventário florestal convencional;

## 6.3 Hipóteses

A integração de ALS e TLS resulta em estimativas mais acuradas de biomassa acima do solo quando comparada às técnicas convencionais aplicadas e ao uso de dados TLS ou ALS individualmente;

## 6.4 Material e métodos

A coleta e a caracterização dos dados utilizados nesse capítulo, foram apresentadas detalhadamente no Capítulo 2.

Para a realização deste estudo, foram considerados três diferentes cenários, sendo o primeiro baseado somente em variáveis derivadas dos dados ALS, o segundo com dados baseados no dados TLS, e o último, resultante da integração de ambos os conjuntos de dados. Todos os métodos foram executados separadamente, abordando cada um dos cenários.

#### 6.4.1 Processamento da nuvem de pontos ALS

Inicialmente, realizou-se a geração do modelo digital de superfície (MDS) e do modelo digital do terreno (MDT) para a nuvem de pontos ALS, utilizou-se o software FUSION versão 3.60, desenvolvido pelo USDA *Forest Service*. O processamento dos dados foi realizado em ambiente M-DOS do sistema Windows, de modo que, o comando *catalog* foi utilizado para produzir o relatório do conjunto de dados LiDAR, seguido do comando *grounfilter*, para classificar os pontos de solo, o qual baseia-se o algoritmo de filtragem (KRAUS e PFEIR, 1998; REX, 2019).

O MDT foi criado baseando-se nos pontos classificados de solo, e ainda, por meio do comando *grid surface create*. Para a normalização das alturas, foi utilizado o comando *Clip Data*, e gerado o CHM com o comando *canopy model*.

A individualização das Araucárias foi realizada tendo como modelo de entrada o CHM, de modo que, utilizou-se o software ecognition, sendo aplicado o algoritmo de segmentação por regiões. Esse algoritmo baseia-se na classificação orientada ao objeto, que é baseada nos parâmetros de escala, cor (valores espectrais) e forma (suavização e compactação).

A segmentação de copas das Araucárias foi realizada por meio da combinação de valores de escala (*Scale Parameter*) e parâmetros de forma e compacidade (*Shape* e *Compactness*). Os valores testados foram: *Scale Parameter* - *SP* variando de 10 a 50 com intervalo de 5. Enquanto que para os parâmetros (*Shape* - *forma* e *Compactness*) foram testados valores entre 0,1 e 0,9 com intervalo de 0,1 entre os parâmetros. Após o procedimento de

segmentação, os resultados foram exportados para o software Arcgis 10.5 e sobre o CHM foram selecionadas as copas. Posteriormente, foram extraídos os valores correspondentes de altura total dos indivíduos via nuvem LiDAR, bem como a área de copa (AC), em metros quadrados (m<sup>2</sup>).

Estudo realizado por Rex (2019), considera que o software eCognition apresenta bons resultados para segmentação de copas utilizando o CHM, de modo que, o software apresenta uma abordagem de classificação automática e permite que o usuário realize o processo de classificação visual, sendo possível aplicar a fotointerpretação considerando a resposta espectral dos alvos.

#### 6.4.2 Processamento da nuvem de pontos TLS

Após o registro da nuvem de pontos TLS (conforme detalhamento no cap. 2), a segmentação das Araucárias obtidas com o TLS foi realizada por meio software Scene Faro, logo realizaram-se as filtragens e estimativas por meio do algoritmo TreeQSM. Foram extraídos os valores de altura e área de copa para os indivíduos observados.

#### 6.4.3 Integração de dados ALS e TLS

Para a integração dos dados ALS e TLS utilizou-se o software *cloudcompare*, de modo que, em um primeiro instante, realizou-se a transformação do sistema de referência das nuvens, colocando ambas em um mesmo sistema. A nuvem de pontos ALS estava em um sistema de referência geográfico, enquanto a nuvem do TLS estava em um sistema de referência local. Após a transformação, os dados foram integrados de forma manual, considerando que a Araucária apresenta uma estrutura de copa bem característica, o que facilita o primeiro passo da integração da nuvem de pontos ALS com TLS, sendo posteriormente realizado um refinamento utilizando as coordenadas obtidas com GPS de precisão e pontos das araucárias.

O software cloudcompare possui algumas ferramentas para que seja realizada a integração de diferentes nuvens de pontos, nesse caso, utilizou-se o comando “*aligns two point clouds*”, e após o alinhamento das nuvens, utilizou-se o comando *merge* para que as nuvens fossem unificadas.

A partir da integração das duas bases de dados, a área de copa e altura foi gerada por meio do pacote r LiDAR, aplicando-se o comando *Crown Metrics*.

#### 6.4.4 Estimativa de biomassa acima do solo para as Araucárias

A biomassa acima do solo estimada para as Araucárias foi realizada para os dados LiDAR obtidos com o ALS, com o TLS e proveniente da integração de ambos. Tendo em vista que, os dados provenientes do ALS não possibilitam gerar estimativas de dap diretamente, ajustou-se um modelo considerando a área de copa como entrada de dados, de modo que, os valores de dap foram estimados, visto que, a *Araucaria angustifolia* apresenta uma forte correlação linear entre os dados de dap e área de copa.

As equações foram propostas por tamanho de área de copa, isso foi realizado porque as relações de dap em função da área de copa mudam conforme o tamanho da árvore. Para tanto, foram testados modelos lineares simples e também funções de polinômios de segundo grau.

A partir dos valores de dap estimados para a integração dos dados, a biomassa acima do solo foi estimada por meio da equação de Schumacher Hall especificada no Capítulo 3, o qual foi desenvolvida para a *Araucaria angustifolia* neste estudo.

#### 6.4.5 Análise estatística

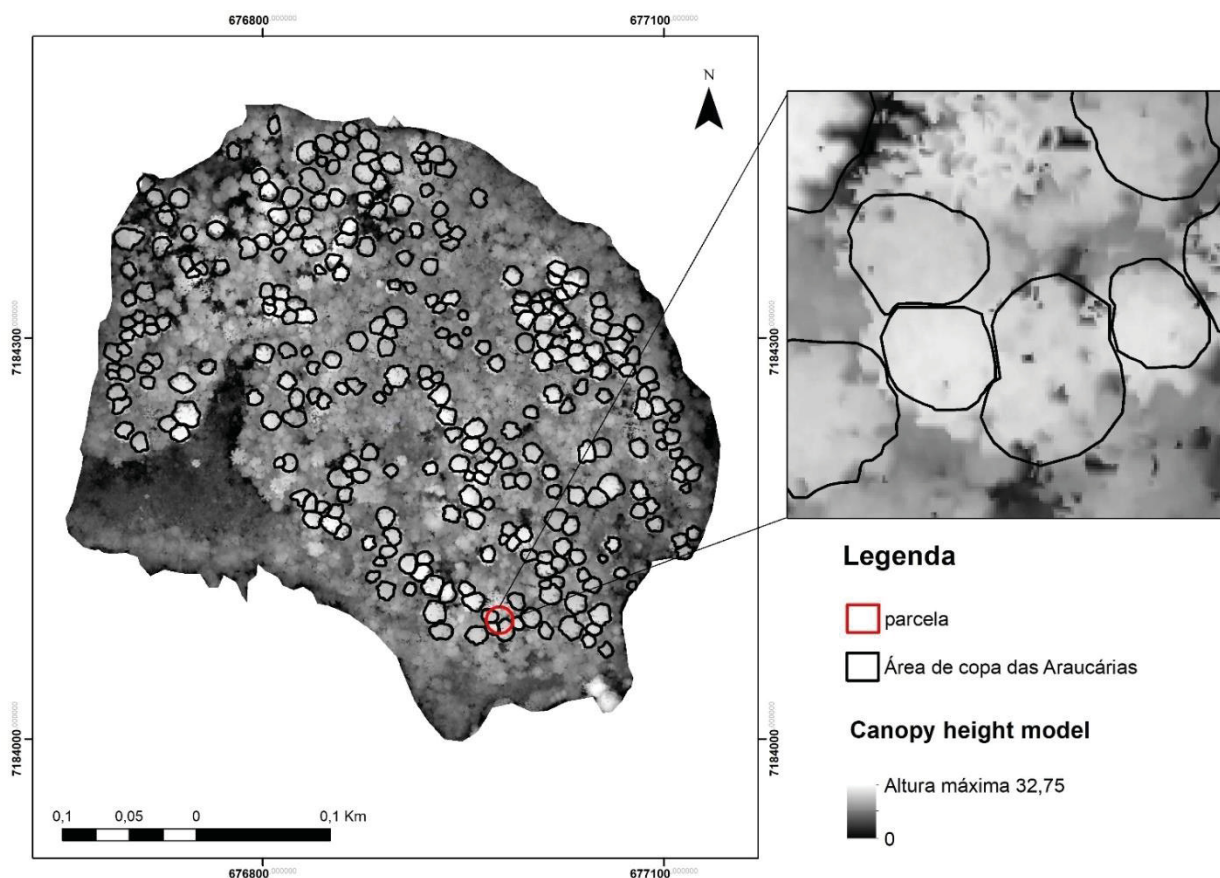
Após a geração dos valores de área de copa, dap e biomassa acima do solo, foi realizada a análise estatística dos dados baseando-se coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e viés e precisão.

## 6.5 Resultados e discussão

Gerou-se o modelo digital do terreno (MDT), modelo digital de superfície (MDS) e *canopy height model* (CHM) utilizando os dados provenientes do laser scanner aéreo. Esses modelos foram gerados para toda a área de estudo, de modo que, logo foram recortadas apenas as Araucárias de interesse.

O MDT variou de 890,5 a 922,7 m, considerando toda a vegetação existente nele, e o MDS, variou de 894,8 a 937,9 m. A partir destes modelos foi realizado uma subtração e extraído o CHM, com este foi possível obter as alturas das árvores. Na figura 31 está apresentada a delimitação de todas as copas das Araucárias, sendo o valor máximo encontrado de 32,75 m para a área total e para os indivíduos selecionados de 25,92 m.

FIGURA 31 - DELIMITAÇÃO DAS ARAUCÁRIAS NO EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO EM CURITIBA, POR MEIO DO CHM



FONTE: Elaborado pela autora



Na Tabela 13 está representada a diferença entre os valores de área de copa obtidos para os dados ALS, TLS e integração.

TABELA 13 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS TRÊS CENÁRIOS TESTADOS PARA ÁREA DE COPA

	<b>ALS</b>	<b>TLS</b>	<b>Integração</b>
<b>Média</b>	107,71	91,41	107,28
<b>Erro padrão</b>	8,02	5,72	7,78
<b>Mediana</b>	99,41	93,2	99,33
<b>Desvio padrão</b>	42,45	30,31	41,18
<b>Mínimo</b>	57,52	38,60	58,60
<b>Máximo</b>	192,29	156,90	188,90

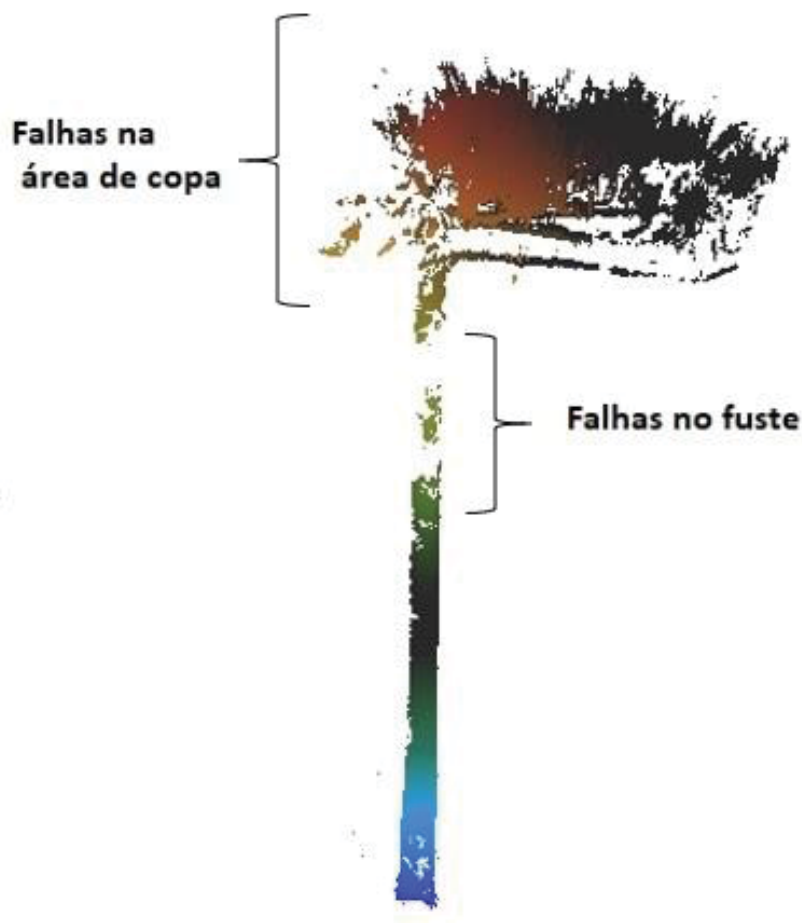
FONTE: Elaborado pela autora

A integração do ALS e TLS apresentou valores de área de copa próximos aos gerados pelo ALS, sendo os valores de 58,6 m até 188,9, com valor médio de 107,284. Quanto aos valores gerados pelo TLS, as alturas variaram de 17,07 a 25,93 m, e área de copa variou de 38,6 a 156,9, com valor médio de 91,41. Os valores gerados pelo TLS foram menores do que os gerados pelo ALS, apresentado uma subestimativa na mensuração dos dados, o que já era esperado, considerando que o TLS não é capaz de scanear a copa das árvores com tanto detalhamento, principalmente quando aplicado em florestas nativas, onde ocorre uma grande sobreposição do dossel.

Além disso, algumas árvores tiveram parte do dossel oclusa, tanto pela sobreposição de árvores adjacentes, sombreamento e curto alcance angular do equipamento. Na Figura 32 está representado exemplo o qual a Araucária apresenta falhas no dossel. Em casos como esse, onde necessita-se o detalhamento da copa e informações precisas de dap e afilamento do fuste, considera-se importante a integração dos dados, pois o TLS é capaz de detalhar a parte inferior da árvore e o ALS a parte superior, agregando uma riqueza maior de detalhamento no modelo 3 D.

A figura citada apresenta um caso comum de ocorrência com TLS, porém, ao aplicar-se o algoritmo TreeQSM para estimar a volumetria, essa falha não exerce influência importante sobre a qualidade do produto final.

FIGURA 32 – *Araucaria angustifolia* SCANEADA PELO TLS COM FALHAS NO DOSSEL EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



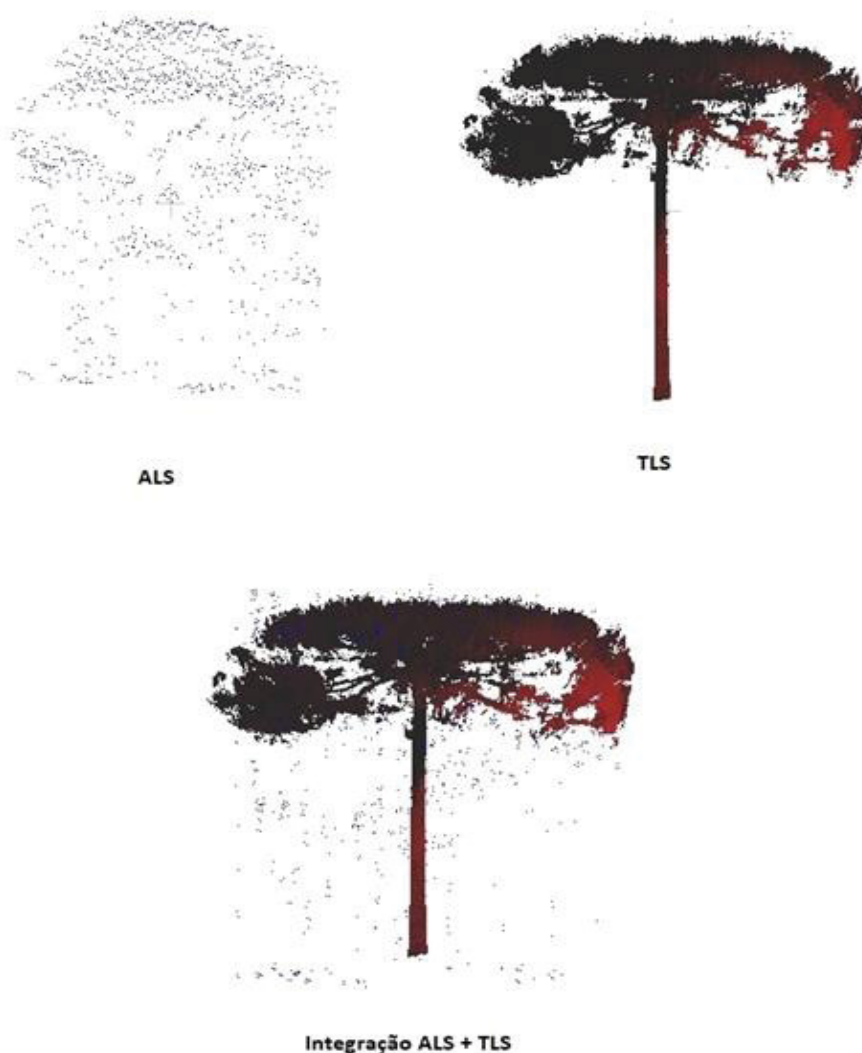
FONTE: Elaborado pela autora

A estimativa da altura de árvores por TLS é menos precisa do que pelo ALS, pois as oclusões das folhas nas porções mais altas das árvores são comuns (VAN LEEUWEN; NIEUWENHUIS, 2010). Dessa forma, é comum que os dados TLS subestimem as alturas (LIANG et al., 2016). As estimativas de biomassa e volume derivadas de TLS de maneira geral são acuradas e demonstram-se muito promissoras devido ao fato de serem passíveis de mensuração diretamente na nuvem de pontos (LIANG et al., 2016; WHITE et al., 2016).

Simonse et al. (2003), consideram que, existe uma grande dificuldade de isolar as árvores em um levantamento utilizando o laser scanner terrestre em áreas heterogêneas devido as sobreposições de copas. Desafio que pode ser encontrado no processamento para a floresta tropical e subtropical e em áreas com grande densidade de indivíduos.

Na Figura 33 está representada a integração dos dados ALS e TLS, onde os pontos em azul referem-se a nuvem de pontos ALS, e os pontos em vermelho referem-se a nuvem de pontos TLS.

FIGURA 33 - REPRESENTAÇÃO DA INTEGRAÇÃO DE DADOS ALS E TLS EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR



FONTE: Elaborado pela autora

Observa-se que, com a nuvem de pontos ALS apresenta um maior detalhamento da área de copa em relação ao TLS. O laser scanner terrestre não é capaz de apresentar uma grande acurácia na área de copa, tendo em vista que o levantamento é realizado no sentido de baixo para cima, e também pode sofrer variação em função da angulação do sensor. Porém, em alguns casos, o TLS apresentou uma área de abrangência maior do que o ALS, possivelmente pela sobreposição de copas e dificuldade de segmentação, considerando que trata-se de uma floresta nativa.

Sanquetta et al. (2011), consideram que a copa da Araucária tem uma alta correlação com os dados de dap, em função disso, realizou-se uma análise de correlação de Pearson entre os valores de área de copa gerados pelo ALS, TLS e integração de ambos, com os dados de dap obtidos em campo. A correlação entre o ALS e o dap foi a considerada mais satisfatória, com  $r = 0,81$ , com o TLS o  $r = 0,72$ , e com a integração foi  $r = 0,80$ . A partir disso, foram gerados os modelos de estimativa de dap baseados em classes de área de copa, conforme podem ser visualizados na tabela 14.

TABELA 14 - EQUAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE DAP BASEADO EM CLASSES DE ÁREA DE COPA

<b>Classes de área de copa</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Área de copa até 73,7 m <sup>2</sup>	$dap = -0,2905*(AC^2) + 40,532*(AC) - 1351$	0,94
Área de copa de 73,7 m <sup>2</sup> até 160,3 m <sup>2</sup>	$dap = 0,0029*(AC^2) - 0,523*(AC) + 83,829$	0,93
Área de copa maiores que 160,4 m <sup>2</sup>	$dap = -1,1043*(AC) + 287,13$	0,99

Onde: AC= área de copa, dap= diâmetro a 1,30 m

FONTE: Elaborado pela autora

A partir dos valores de dap gerados por cada classe de AC, estimou-se os valores de biomassa acima do solo para cada método, baseado no modelo de Schumacher Hall desenvolvido no Capítulo 3.

Na Tabela 15 estão apresentados os valores de AGB para os três cenários testados (ALS, TLS e Integração), e ainda, comparados com os valores de inventário florestal convencional.

TABELA 15- VALORES DE AGB PARA OS TRÊS CENÁRIOS ( ALS, TLS E INTEGRAÇÃO) COMPARADOS AOS VALORES OBTIDOS PELO INVENTÁRIO FLORESTAL CONVENCIONAL EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA URBANO NO MUNICÍPIO DE CURITIBA - PR

	<b>ALS</b>	<b>TLS</b>	<b>Integração</b>	<b>IFC</b>
<b>Mínimo (kg)</b>	101,51	169,76	369,70	326,61
<b>Máximo (kg)</b>	4196,06	3690,22	4218,35	4238,35
<b>Média (kg)</b>	1933,45	1245,52	1976,82	2055,28
<b>Desvio padrão</b>	875,33	560,90	842,72	818,96

FONTE: Elaborada pela autora

A AGB estimada pelo ALS variou de 101,51 kg a 4196,06 kg por árvore, sendo que para o TLS esses valores foram de 169,76 kg a 3690,22, e para a integração a biomassa estimada foi de 369,70 kg a 4128,35 kg por árvore. Quando comparados com os dados de campo, os dados da integração apresentaram um viés de 2,17%, precisão de 11,83 % e acurácia de 12,03%.

Considerando que, a integração dos dados ALS e TLS foi entendida satisfatória para o cenário testado. A integração de dados é uma tendência, porém, deve-se sempre analisar o enfoque do estudo, tempo de coleta e processamento de dados, associado ao custo. Além disso, os resultados apresentados nesse capítulo são difíceis de comparar com estudos anteriores, tendo em vista que, a literatura apresenta poucos estudos utilizando a integração TSL e ALS.

De acordo com Martins Netto (2016), no hemisfério norte e na Austrália a integração de dados provenientes de diferentes fontes de Sensoriamento Remoto é uma realidade, propiciando uma melhora na qualidade de dados obtidos e ampliando a gama de informações a serem extraídas comparadas ao uso de dados de sensores individuais e aos métodos de inventário florestal convencionais.

Atualmente, muitos pesquisadores têm realizado a integração de dados LiDAR com outras fontes de dados baseados em Sensoriamento Remoto, como por exemplo, o uso de sensores hiperespectrais.

Basezew et al. (2017), realizou um estudo sobre a acurácia de pesquisas utilizando a tecnologia LiDAR, sendo que os melhores valores encontrados foram para a combinação de ALS e TLS, conforme está descrito na tabela 16.

TABELA 16 - RELAÇÃO DE TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM LIDAR E ACURÁCIA

<b>Localização da floresta</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Acurácia</b>	<b>Autor</b>
Norway Spruce dominated Boreal forest of Norway	ALS	$R^2 = 0,88$	Naesset e Gobakken, 2008
Pine plantation of Houston National forest, USA	ALS	$R^2 = 0,88$	Popescu (2007)
Turkey lakes watershed forest of Canada	ALS	$R^2 = 0,80$	Fritz et al. (2011)
Tropical forest of Hawaii, Island – Amazonian Peru, central Panama and moist forest of Madagascar	ALS	$R^2 = 0,84, 0,83, 0,085, 0,68$	Asner et al. (2012)
Tropical forest of Gola rainforest national park of Sierra Leone	ALS	$R^2 = 0,70$	Vaglio et al. (2014)
Tropical rainforest of northern Borneo, Malaysia	ALS	$R^2 = 0,78$	Ioki et al. (2014)
Central Panama of old growth tropical forest	ALS	$R^2 = 0,70, 0,75$	Meyer et al. (2013)
Northern basin and range forest, USA	TLS	$R^2 = 0,83, 0,92$	Olsoy et al. (2014)
Ayer Hitam tropical rainforest, Malaysia	Combinação de TLS e ALS	$R^2 = 0,98$	Lawas (2016)
Ayer Hitam tropical rainforest, Malaysia	Combinação de TLS e ALS	$R^2 = 0,96$	Basezew (2017)

FONTE: Adaptado de Basezew, 2017

Diante dos estudos apresentados pelo autor, a integração do ALS e TLS é bastante promissora, de modo que, os maiores valores de acurácia foram encontrados em cenários com a combinação das duas tecnologias, sendo apresentados valores de  $R^2$  de 0,98 e 0,96.

No entanto, alguns estudos apresentam a complexidade de trabalhar com esse tipo de informação, principalmente ao que se refere a florestas tropicais,

como no trabalho realizado por Bazezew et al. (2018), aplicado a uma floresta tropical da Malásia, que considerou a mensuração das variáveis florestais desafiadora, devido à complexidade natural da floresta. De modo que, foi necessário realizar a extração de informações por classe do dossel, sendo em camadas com dossel múltiplo, utilizando o ALS para detecção de árvores emergentes e médias no dossel. O que pode ser considerado um processo que demanda bastante tempo de processamento dos dados e conhecimento da área de estudo.

Estimativas de AGB utilizando dados de entrada como área de copa podem ser aceitos como uma boa alternativa, considerando a facilidade de acesso a esse tipo de informação com os dados ALS. Rex et al (2018), desenvolveram um modelo para estimar a biomassa acima do solo de *Araucaria angustifolia* para a mesma área de estudo com dados ALS, o qual apresentou  $R^2$  (%) de 96,10 e 98,89. O estoque total de AGB encontrado foi de 246.333 kg para 297 indivíduos. Os autores consideram que o uso de área de copa para estimativa de AGB é eficiente, além de não utilizar métodos destrutivos, os dados são processados de forma rápida e precisa.

Orfanó Figueiredo et al. (2014), consideram que as equações volumétricas que adotaram exclusivamente variáveis de copa, obtiveram resultados estatísticos similares as equações de simples entrada (com dap) em estudos dendrométricos na Amazônia utilizando dados LiDAR aerotransportado. Os autores desenvolveram equações para floresta tropical na Amazônia para estimar o volume do fuste de árvores individuais dominantes e codominantes, levando em consideração acoleta em campo do diâmetro à altura do peito (DAP), conjuntamente com variáveis morfométrica da copa, utilizando apenas os dados de morfometria de copa.



## 6.6 Conclusões

A integração dos dados ALS e TLS possibilitou a geração de estimativas de biomassa acima do solo (AGB) acuradas da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. Os cenários testados comprovaram que o uso do ALS e TLS concomitante possibilitam uma maior acurácia nas estimativas, do que quando comparados com os cenários utilizando o ALS e TLS individualmente.

Recomenda-se que para outros estudos, novos cenários de integração de fontes de dados sejam testados, bem como, o uso de LiDAR portátil, embarcado em VANTs e uso de sensores hiperespectrais.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A tecnologia LiDAR propiciou gerar estimativas acuradas de variáveis dendrométricas da *Araucaria angustifolia*. Os modelos de estruturas quantitativas foram capazes de gerar uma modelagem tridimensional da árvore com grande acurácia, possibilitando a obtenção de informações de variáveis dendrométricas e biomassa acima do solo. Além disso, a automatização do processamento de dados por meio de programação computacional foi considerada um grande avanço, devido a confiabilidade da modelagem associado a gratuidade dos códigos utilizados.

O protocolo de coleta de dados com TLS foi considerado de suma importância, tendo em vista que o uso de fitas refletivas e coloração das esferas possibilitou uma maior confiabilidade nas nuvens de pontos geradas, facilitando o processo de registro das varreduras de forma semi-automatizada.

A redução da densidade de pontos foi comprovadamente apropriada, o qual o estudo servirá como base para que o usuário possa optar por uma nuvem de pontos menos densa, possibilitando um menor custo e tempo de processamento dos dados.

A integração de dados ALS e TLS propiciou uma maior acurácia dos dados, propiciando um maior detalhamento do dossel, o que é considerado de grande interesse a estudos ecológicos e estruturais da floresta, principalmente ao que se refere a florestas nativas do Brasil.

Os resultados encontrados em todos os capítulos evidenciaram que é possível estimar as variáveis dendrométricas e obter informações estruturais da floresta de forma acurada utilizando a tecnologia LiDAR. Logo, conclui-se que o TLS e ALS apresentam grande potencial na realização de inventários de florestas nativas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que sejam testados diferentes tipos de plataformas para coleta de dados, como o Laser scanner terrestre portátil e o Laser embarcado em aeronaves remotamente pilotadas. Além disso, considera-se importante avaliar a influência da densidade de pontos ao alterar o tempo de

escaneamento com o laser scanner terrestre, obtendo uma menor densidade de pontos na etapa de coleta, otimizando o tempo de levantamento de campo e processamento dos dados.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA R. A.; NELSON B. W.; SCHIETTI J. S. A.; GORGENS E. B.; RESENDE A. F. LiDAR terrestre portátil para atributos estruturais em florestas de igapó e terra firme na Amazônia, 2014, Curitiba. **Anais...** XI Seminário de Atualização de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal.

ALVES, M.V.G. **Estimativa de variáveis florestais com perfilhamento a laser (LiDAR)**. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

ANDERSEN, H. E.; REUTEBUCH, S. E.; MCGAUGHEY, R. J.; OLIVEIRA, M. V. N. D.; KELLER, M. Monitoring selective logging in western Amazonia with repeat lidar flights. **Remote Sensing of Environment**, v. 11, n. 3, p. 5783-5804, 2013.

ANDERSEN, K.E.; GLENN, N.F.; SPAETE, L.P.; SHINNEMAN, D.J.; PILLIOD, D.S.; ARKLE, R.S.; MCLLOY, S.K.; DERRYBERRY, D.R. Estimating vegetation biomass and cover across large plots in shrub and grass dominated using terrestrial lidar and machine learning, **Ecological indicators**, v.84, p.793-802, 2018.

ARAUJO, L. S. de; KELLER, M.; OLIVEIRA, M. V. N. D.; VICTORIA, D. de C.; MORTON, D.; TAKEMURA, C. M.; HUNTER, M. O. Dados LiDAR e análise orientada a objeto no monitoramento de manejo florestal. **Anais...** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013.

ARAUJO, L. S. de; SANTOS, M. N. DOS; PINAGÉ, E. R.; KELLER, M.; LONGO, M. Análise multitemporal de dados LiDAR na caracterização da floresta secundária na região da FLONA Tapajós. **Anais...** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa, INPE.

BABCOCK, C.; FINLEY, A.O.; COOK, B.D.; WEISKITTEL, A.; WOODAL, C.W. Modeling forest biomass and growth: Coupling long-term inventory and LiDAR data, **Remote Sensing of Environment**, v.182, p.1-12, 2016.

BAUWENS, S., BARTHOLOMEUS, H., CALDERS, K., LEJEUNE, P. Forest inventory with terrestrial LiDAR: a comparison of static and hand-held mobile laser scanning. **Forests**, v. 7, p.127, 2016.

BAZEZEW, M.N.; HUSSIN, Y.A.; KLOOSTERMAN, E.H. Integrating airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v.73, p. 638-652, 2018.

BELAND, M.; PARKER, G.; SPARROW, B.; HARDING, D.; CHASMER, L.; PHINN, S.; ANTONARAKIS, A.; STRAHLER, A. On promoting the use of LiDAR systems in forest ecosystem research, **Forest Ecology and Management**, v. 450, p.1-9, 2019.

BREIDENBACH, J., ASTRUP, R. Small area estimation of forest attributes in the Norwegian National Forest Inventory. **European Journal of Forest Research**, v.131, 1255–1267, 2012.

BRUSA, A.; BUNKER, D.E. Increasing the precision of canopy closure estimates from hemispherical photography: blue channel analysis and under-exposure. **Agricultural and forest meteorology**, p. 102-107, 2014.

BUCK, A.L.B.; **Análise de métodos de filtragem em dados Laser Scanner Terrestre aplicados à modelagem tridimensional do tronco de *Pinus spp.*** 128 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2011.

BUCK, A.L.B.; **Modelagem de dados laser scanner terrestre para estimativa do volume em plantios clonais de *Eucalyptus spp.*** 145 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2016.

CALDER, K.; NEWNHAM, G.; BURT, A.; MURPHY, S.; RAUMONEN, P.; HEROLD, M.; CULVENOR, D.; AVITABILE, V.; DISNEY, M.; ARMSTRONG, J.; KAASALAINEN, M. Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning, **Methods in Ecology and Evolution**, p.198-208, 2015.

CAMPBELL, M.J.; DENNISON, P.E.; HUDAK, A.T.; PARHAM, L.M.; BUTLER, B.W. Quantifying understory vegetation density using small-footprint airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v.215, 2018.

CAMPOS, M. **A portable mobile terrestrial system with omnidirectional camera for close range applications**, tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, 2019.

CAMPOS, M., TOMMASELLI, A., HONKAVAARA, E., PROL, F., KAARTINEN, H., EL ISSAOUI, A., HAKALA, T. A backpack-mounted omnidirectional camera with off-the-shelf navigation sensors for mobile terrestrial mapping: development and forest application. **Sensors** 18, 827, 2018..

CARVALHO, S.P.C. **Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de Eucalyptus sp.** 105f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CHE, E.; OLSEN, M.J. Multi-scan segmentation of terrestrial laser scanning data based on normal variation analysis, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.143, p.233-248, 2018.

COLAÇO, A.F. **Mobile terrestrial laser scanner for site-specific management in orange crop.** 88 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

COLPINI, C.; TRAVAGIN, D.P.; SOARES, T.S.; SILVA, V.S.M. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso, **Acta Amazonica**, v.39, p.97-104, 2009.

COMINO, M.; ANDUJAR, C.; CHICA, A.; BRUNET, P. Error-aware construction and rendering of multi-scan panoramas from massive point clouds, **Computer vision and Image Understanding**, v.157, p.43-54, 2017.

COOPER, S.D., ROY, D.P., SCHAAF, C.B., PAYNTER, I., 2017. Examination of the potential of terrestrial laser scanning and structure-from-Motion photogrammetry for rapid nondestructive field measurement of grass biomass. **Remote Sensing**. 9 (6), 531.

COSTA, E.A.; FINGER, C.A.G.; SCHNEIDER, P.R.; HESS, A.F.; Função de afilamento e sortimento de madeira para *Araucaria angustifolia*, **Ciência florestal**, v.26, n.2, p.523-533, 2016.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laser scanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2004.

DANDOIS, J.; ELLIS, E.C. High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. **Remote Sensing of Environment**. 136, 259, 2013.

DITTMANN, S.; THIESSEN, E.; HARTUNG, E. Applicability of different non-invasive methods for tree mass estimation: a review. **Forest Ecology and Management**, v.398, 208– 215, 2017.

D'OLIVEIRA, M.V. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**. 124, 479-491, 2012.

DURIGAN, M.E. **Florística, dinâmica e análise de uma Floresta Ombrófila Mista em São João do Triunfo – PR**.138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

DUTRA, L.V.; MURA, J.C.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; ELMIRO, M.T. **Processamento de imagens de Radar de Abertura Sintética – Princípios e aplicações**, p.4-13, 2003.

ELLIS, P. Mapping selective logging impacts in Borneo with GPS and airborne lidar. **Forest Ecology and Management**. 365, 184-196, 2016.

ELSEBERG, J.; BORRMANN, D.; NUCHTER, A. One billion points in the cloud – an octree for efficient processing of 3D laser scans, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.76, p.76-88, 2013.

FERRARA, R.; VIRDIS, S.G.P.; VENTURA, A.; GHISU, T.; DUCE, P.; PELLIZZARO, G. An automated approach for wood-lead separation from terrestrial LiDAR point clouds using the density based clustering algorithm DBSCAN, **Agricultural and Forest Meteorology**, v.262, p.434-444, 2018.

FERRARI, F. **Visualização e interpretação de modelos digitais de afloramentos utilizando laser scanner terrestre**. 40f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2011.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d'; BRAZ, E. M.; PAPA, D. de A.; FEARNside, P. M. LiDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: comparisons of ground-based and



remotely sensed estimates. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 187, p. 281-293, 2016.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d'; FEARNside, P. M.; PAPA, D. de A. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com LiDAR. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 621-628, 2014.

FIGUEIREDO, E. O; D'OLIVEIRA, M.V.N.; BRAZ, E.M.; PAPA, D.A.; FEARNside, P.M. LiDAR-based estimation of bole biomass for precision management of an Amazonian forest: Comparisons of ground-based and remotely sensed estimates. **Remote Sensing of Environment**. 187, 281-293, 2016.

GAGO, J.; DOUTHE, C.; COOPMAN, R.E.; GALLEG0, P.P.; RIBAS-CARBO, M.; FLEXAS, J.; ESCALONA, J.; MEDRANO, H. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. **Agriculture Water Management**, 153, p.9-19, 2015.

GEDi, **GEDi ECOSYSTEM LiDAR**. Disponível em: <https://gedi.umd.edu/mission/mission-overview/> acesso em mar/2019

GHAZOUL, J.; SHEIL, D. **Tropical Rain Forest Ecology, Diversity, and Conservation**. Oxford University Press, Oxford, U.K. 496p. 2010.

GONZALEZ DE TANAGO, J., LAU, A., BARTHOLOMEUS, H., HEROLD, M., AVITABILE, V., RAUMONEN, P., MARTIUS, C., GOODMAN, R.C., DISNEY, M., MANURI, S., BURT, A., CALDERS, K.. Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial LiDAR. **Methods Ecology**. v.9, 223-234, 2018.

GÖRGENS, E.B. Characterization of Brazilian forest types utilizing canopy height profiles derived from airborne laser scanning. **Applied Vegetation Science**. V. 19, p.518-527, 2016.

GORGENS, E.B. **LiDAR technology applied to vegetation quantification and qualification**. 2014.Tese (Doutorado) – Universidade São Paulo.

GUERRA, M.P., SILVEIRA, V., DOS REIS, M.S., SCHNEIDER, L. Exploração, manejo e conservação da araucária (*Araucaria angustifolia*). In: Lino, C.F.,

Simões, L.L. (Eds.), **Sustentável Mata Atlântica: A Exploração de Seus Recursos Florestais**. Senac, São Paulo, pp. 85–102, 2002.

GUO, Q.; SU, Y.; HU, T.; ZHAO, X.; WU, F.; LI, Y.; LIU, J.; CHEN, L. XU, G.; ZHENG, Y.; LIN, Y.; MI, X.; FEI, L.; WANG, X. An integrated UAV-borne LiDAR system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China. **International Journal of Remote Sensing**, v.38, 2594-2972, 2017.

HACKENBERG, J.J., WASSENBERG, M.M., SPIECKER, H.H., SUN, D.D. Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density. **Forests**, v.6, 1274–1300, 2015.

HARDIMAN, B. S., BOHRER, G., GOUGH, C. M., VOGEL, C. S., CURTIS, P. S. The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest. **Ecology**, v.92, p.1818-1827, 2011.

HEALEY, S., PATTERSON, P., SAATCHI, S., LEFSKY, M., LISTER, A., & FREEMAN, E. A sample design for globally consistent biomass estimation using lidar data from the geoscience laser altimeter system (glas). **Carbon Balance and Management**, 7, 10, 2012.

HENRY, M; et al. An overview of existing and promising technologies for national forest monitoring. **Annals of Forest Science**, v.6, 779, 2015.

HENTZ, A.M.K.; **Obtenção de informações dendrométricas para inventário florestal automatizado por meio de Veículo Aéreo não tripulado (VANT)**, 239f. Tese (doutorado), Universidade Federal do Paraná, 2018.

HUMMEL, S., HUDAK, A.T., UEBLER, E.H., FALKOWSKI, M.J., MEGOWN, K.A. A comparison of accuracy and cost of lidar versus stand exam data for landscape management on the Malheur National Forest. **Journal of Forestry**, p. 267–273, 2011.

HUSAIN, A.; VAISHYA; R.C. Road surface and its center line and boundary lines detection using terrestrial LiDAR data. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v.21, p.363-374, 2018.

JAAKOLA, A.; HYYPA, J.; KUKKO, A.; YU, X.; KAARTINEN, H.; LEHTOMAKI, M.; LIN, Y. A low cost mult-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. **Photogrammetry of Remote Sensing**, 65, 514-522, 2010.

JAKUBOWSKI, M.K.; GUO, Q.; KELLY, M. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy, **Remote Sensing of Environment**, v.130, p.245-253, 2013.

KLAUBERG, C. Short-Term Effects of Reduced-Impact Logging on *Copaifera* spp. (Fabaceae) Regeneration in Eastern Amazon. **Forests**, v.8, 7, 1, 2017.

KROOKS, A.; KAASALAINEN, S.; KANKARE, V.; JOENSUU, M.; RAUMONEN, P.; KAASALAINEN, M. Predicting tree structure from tree height using terrestrial laser scanning and quantitative structure models, **Silva fennica**, v.48, n.2, 2014.

KÜHL, A.S.; NAKAJIMA, N.Y. **Tecnologia Laser Aerotransportada (LiDAR) aplicada à adequação à legislação florestal de propriedades rurais: um estudo de caso**. 37f. Monografia (Especialização em Gestão Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, 2015.

LARANJA, D.C.F. **Estudo de parâmetros populacionais de plantios clonais de *Eucalyptus* spp. a partir de nuvens de pontos obtidos com escaneamento a laser aerotransportado**. 138f. Dissertação (mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

LAURIN, G.V.; PULETTI, N.; CHEN, Q.; CORONA, P.; PAPALE, D.; VALENTINI, R. Above ground biomass and tree species richness estimation with airborne lidar in tropical Ghana forests, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.52, p.371-379, 2016.

LEITOLD, V.; ; MORTON, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E. Variação na escala da paisagem em estrutura e biomassa florestal ao longo de um gradiente de elevação na floresta Atlântico de serra do Mar, Brasil. Embrapa, 2015. **Anais...**

LI, M.; SUN, C.; Refinement of LiDAR point clouds using a super voxel based approach, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 143, p.213-221, 2018.

LIANG, X.; HYYPPA, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; YU, X.. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots.. **Remote Sensing**. v.11, 1504–1508, 2014.

LIANG, X.; KANKARE, V.; HYYPPÄ, J.; WANG, Y.; KUKKO, A.; HAGGREN, H. et al., Terrestrial laser scanning forest inventories. **Remote Sensing**, v.115, 63-77, 2016.

LIANG, X.; KUKKO, A.; HYYPPA, J.; LEHTOMAKI, M.; PYORALA, J.; YU, X.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; WANG, Y. In-situ measurements from mobile platforms: An emerging approach to address the old challenges associated with forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.143, p.97-107, 2018.

LINGNAU, C.; SILVA, M.N.; SANTOS, D.S.; MACHADO, A.; LIMA, J.G.S. Mensuração de alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre, **ambiência**, p.85-96, 2008.

LOCKS, C.J. **Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal**. 97f. Dissertação (mestrado em Ciências florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

LOUBACK, E. Vegetation damage in the vicinity of an aluminum smelter in Brazil. **Ecological Indicators**. v.67, 193-203, 2016.

MACHADO, S.A.; NASCIMENTO, R.G.M.; AUGUSTYNICZIK, A.L.D.; SILVA, L.C.R.; FIGURA, M.A.; PEREIRA, E.M.; TEO, S.J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no Capão da Engenharia Florestal da UFPR, **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.56, p.5-16, 2008.

MALHI, Y.; JACKSON, T.; BENTLEY, L.P.; LAU, A.; SHENKIN, A.; HEROLD, M.; CALDERS, K.; BARTHOLOMEUS, H.; DISNEY, M.I. New perspectives on the ecology of tree structure and tree communities through terrestrial laser scanning. **Interface focus**, v.6, 2018.

MARKKU, A.; RAUMONEN, P.; KAASALAINEN, M.; CASELLA, E. Analysis of Geometric Primitives in Quantitative Structure Models of tree stems, **Remote Sensing**, p. 4581-4603, 2015.

MÁRQUEZ, A. **Un tratado sobre el escaner terrestre TLS**. Caracas: Mecinca, 2010.

MARTINS NETO, R.P.; BUCK, A.L.B.; SILVA, M.N.; CHRISTEL, L.; LIMA, A.M.; PESCK, V.A. Avaliação da varredura laser Terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p.420-433, 2013.

MARTINS, M.A.R. **Geração de ortoimagens a partir de georreferenciamento direto de imagens digitais aéreas de pequeno formato com dados LiDAR**. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MARTINS, P.J.; MAZON, J.A.; MARTINKOSKI, L.; BENIN, C.C.; WATZLAWICK, L.F.; Dinâmica da vegetação arbórea em Floresta Ombrófila Mista Montana antropizada, **Floresta e Ambiente**, 2017.

MEDEIROS J.D.; SAVI M.; BRITO B.F.A. Seleção de áreas para criação de unidades de conservação na Floresta Ombrófila Mista. **Biotemas**, v.18, 2015.

MONTAGNA, T.; LAUTERJUNG, M.B.; COSTA, N.C.F.; BERNARDI, A.P.; RIBEIRO, R.C.; REIS, M.S. Guidelines for seed collection of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze: A genetic, demographic and geographic approach, **Forest Ecology and Management**, v.438, p.10-17, 2019.

MULLER, M; KESTING, A.P.B.; NAKAJIMA, N.Y.; HOSOKAWA, R.T.; ROSOT, N.C. Influence of flight configuration used for LiDAR data collection on individual trees data extraction in forest plantations. **Floresta**. v. 44, 2014.

MÜLLER, M. **Avaliação da influência da configuração de voo para aquisição de dados LIDAR na qualidade das variáveis florestais extraídas em florestas plantadas**. 177 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2013.

NAESSET, E.; BJERKNES, K.O. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of environment**, v.78, 328-340, 2011.

NEWNHAM, G.J., ARMSTON, J.D., MUIR, J., GOODWIN, N., TINDALL, D., CULVENOR, D., PÜSCHEL, P., NYSTRÖM, M., JOHANSEN, K., **Evaluation of Terrestrial Laser Scanners for Measuring Vegetation Structure**, 2012.

NUNES, A.C.M. **Estimativa do estoque de carbono em plantios de Eucalyptus spp. a partir de métricas LiDAR**. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, 2015.

OLIVEIRA, M.F.; MATTOS, P.P.; BRAZ, E.M.; ROSOT, M.A.D.; ROSOT, N.C.; SANTOS, W.C. Equação de volume para um plantio de *Araucaria angustifolia* em Rio Negro, PR. **Embrapa**, v.275, 2011.

OLIVEIRA, M.V.N.; REUTEBUCH, S.E.; MCGAUGHEY, R.J.; ANDERSEN, H.E. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon, **Remote Sensing of Environment**, v.124, p.479-491, 2012.

OLIVEIRA, L.T.; FERREIRA, M.Z.; CARVALHO, L.M.T.; FERRAZ FILHO, A.C.; OLIVEIRA, T.C.A.; SILVEIRA, E.M.O., JUNIOR, F.W.A. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por scanner a laser aerotransportado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.14, n.9, 2014.

OLIVEIRA, M. V. N. D.; FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, T. K. de; PAPA, D. de A. Potential use of Lidar (light detection and range) to planning agrosilvopastoral systems in degraded lands in Amazon observing the Brazilian forest low and minimizing carbon emissions. **Embrapa**, 2015.

OLIVEIRA, M. V. N. d'; FIGUEIREDO, E. O.; PAPA, D. de A. Uso do Lidar como ferramenta para o manejo de precisão em florestas tropicais. Rio Branco, AC: **Embrapa**, 132 p. 2014.

OLIVEIRA, M.V.N.; OLIVEIRA, L. C. Comparação de modelos lidar para a estimativa de biomassa seca acima do solo de florestas com diferentes históricos de perturbação natural ou antrópica no Estado do Acre. **Anais... SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 18., 2017.

ORELLANA, E., VANCLAY, J.K., Could native *Araucaria* forests be managed for timber production on small farms in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.430, p. 1-9, 2018.

ORFANÓ FIGUEIREDO, E.; OLIVEIRA, N.M.V.; FEARNSSIDE, M.P.; PAPA, D.A. Modelos para estimativa de volume de árvores individuais pela morfometria da copa obtida com LiDAR, **Cerne**, v.20, n.4, p.621-628, 2014.

OTELLO, V.; KERCHOVE, R.V.D.; SATYANARAYANA, B.; MARTINEZ-ESPINOZA, C.; FISOL, M.A.B.; IBRAHIM, M.R.B.; SULONG, I.; LOKMAN, H.M.; LUCAS, R.; GUEBAS, F.D. **Forest Ecology and Management**, v.411, p.35-45, 2018.

PANTOJA, N. V.; OLIVEIRA, M. V. N. d'; HIGUCHI, N. Detecção da exploração madeireira a partir de imagens Landsat e dados LiDAR no Sudoeste da Amazônia. **Anais...** Simpósio brasileiro de Sensoriamento Remoto, 18., 2017, Santos.

PAPA, D. de A.; FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. V. N. d'. Volumetria de árvores dominantes e co-dominantes a partir de dados LiDAR aerotransportado. **Anais...** Congresso Regional de Pesquisa do estado do Acre; Seminário de iniciação científica da UFAC, Rio Branco, 2015.

PAPA, D.R.A.; BROADBENT, E.N.; ZAMBRANO, A.M.A.; WILKISON, B.E.; FERREIRA, M.E.; CHAZDON, R.; MELI, P.; GORGENS, E.B.; SILVA, C.A.; STARK, S.C.; VALBUENA, R.; PAPA, D.A.; BRANCALION, P.H.S. Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 79, p.192-198, 2019.

PARKER, G. G., HARDING, D. J., BERGER, M. L. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. **Journal of Applied Ecology**, v. 41, n. 4, p. 755- 767, 2004.

PEARSE, G.D.; DASH, J.P.; PERSSON, H.J.; WATT, M.S. Comparison of high-density LiDAR and satellite photogrammetry for forest inventory. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p.257-267, 2018.

PÉLLICO NETO, S.; BRENA, D.A. **Inventário florestal**, Curitiba: editorado pelos autores, 1997, 316p.

PEREIRA, J. P. **Mensuração automática de copas de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze a partir de dados lidar para estimativa de variáveis dendrométricas**. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade do estado de Santa Catarina, 2016.



PESCK, V.A. **Aplicação da Varredura Laser Terrestre em plantios clonais de Eucalyptus spp para determinação do número de árvores e estudos dendrométricos**. 92 f. Tese (Doutorado em engenharia florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2015

PETEAN, F.C.S. **Uso de imagens hiperespectrais e da tecnologia LiDAR na identificação de espécies florestais em ambiente urbano na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais**. 133f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2015.

PETRIE, G., TOTH, C.K. **Terrestrial laser scanners**. In: Shan, J., Toth, C.K. (Eds.), *Topographic Laser Ranging and Scanning*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 87–127, 2008.

PFEIFER, N.; XINLIAN, L.; HYYPÄ, J.; KAARTINEN, H. Terrestrial Laser Scanning in Forest inventories, Mapping the world – **GIM Magazine**, 2017.

PHAM, M.V.; PHAM, T.M.; DU, Q.V.V.; BUI, Q.T.; TRAN, A.V.; PHAM, H.M.; NGUYEN, T.N. Integration Sentinel-1A SAR data and GIS to estimate aboveground biomass and Carbon accumulation for tropical forest types in Thuan Chau district, Vietnam. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.14, p.148-157, 2019.

PICARD, N.; GAMARRA, J.V.P.; BIRIGAZZI, L.; BRANTHOMME, A. Plot-level variability in biomass for tropical forest inventory designs, **Forest Ecology and management**, v.430, p.10-20, 2018.

PINAGÉ, E. R.; KELLER, M.; SANTOS, M. N. DOS; ARAUJO, L. S. de; LONGO, M. Avaliação temporal dos efeitos da exploração madeireira usando dados Lidar. **Anais...** Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 17., 2015.

PIRES, J.M. **Uso do LiDAR (Light Detection and Ranging) para estimação de altura de árvores em povoamentos de Eucalipto**. 50f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 2005.

PITKANEN, P., T., RAUMONEN, P., KANGAS, A. Measuring stem diameters with TLS in boreal forests by complementary fitting procedure. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.147, p. 294-306, 2019.

POPESCU, S. C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, p. 646-655, 2007.

PULITI, S.; ENE, L.T.; GOBAKKEN, T.; NAESSET, E. Use of partial-coverage UAV data in sampling for large scale forest inventories. **Remote sensing of environment**, v.194, p.115-126, 2017.

PUTMAN, E.B.; POPESCU, S.C.; ERIKSSON, M.; ZHOU, T.; KLOCKOW, P.; VOGEL, J.; MOORE, G.W. Detecting and quantifying standing dead tree structure loss with reconstructed tree models using voxelized terrestrial lidar data, **Remote Sensing of Environment**, v.209, p.52-65, 2018.

QUEIROZ, A. M. de; OLIVEIRA, M. V. N. d'; OLIVEIRA, L. C. de; FIGUEIREDO, E. O. Uso do LiDAR para quantificação da perda de biomassa produzida pelo corte de árvores e extração das toras em uma floresta tropical manejada no Estado do Acre. **Anais...** Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, v.18., 2017.

QUEIROZ, A. M. de; OLIVEIRA, M. V. N. d'; OLIVEIRA, L. C. de; FIGUEIREDO, E. O. Uso do LiDAR para quantificação da perda de biomassa produzida pelo corte de árvores e extração das toras em uma floresta tropical manejada no Estado do Acre. **Embrapa**, Acre, 2017.

RANCHER, A.C.; **Methods of multivariate analysis**, Wiley Series in Probability and mathematical statistics, 2001.

RAUMONEN, P.; KAASALAINEN, M.; AKERBLUM, M.; KAASALAINEN, S.; KAARTINEN, H.; VASTARANTA, H.; HOLOPAINEN, M.; DISNEY, M. I.; LEWIS P. Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data. **Advances in Remote Sensing**. v.5, p.491 – 520, 2013

REITZ, R., KLEIN, R.M., 1966. **Araucariáceas**. In: Reitz, R. (Ed.), Flora Ilustrada Catarinense. Herbário Barbosa Rodrigues, Itajaí, pp. 62.

REX, F.E. **Estimativas do estoque e dinâmica de biomassa acima do solo utilizando diferentes abordagens estatística e dados LiDAR em Floresta tropical**. 118f. Dissertação (mestrado) em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná, 2019.

REX, F.E.; CORTE, A.P.D.; MACHADO, S.A.; SILVA, C.A.; SANQUETTA, C.R. Estimating above-ground biomass of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) using LiDAR data. **Floresta e ambiente**, v.26, p.2-11, 2019.

RIBAS, R.P. **Individualização de árvores em ambiente florestal nativo utilizando métodos de segmentação em modelos digitais produzidos a partir da tecnologia LiDAR.** 72f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

ROSA, D.M. **Sistema LiDAR portátil terrestre: estudos e aplicações florestais.** 31f. Monografia (especialização em Gestão Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2014.

RUZA, M.S. **Uso do LiDAR para avaliação da influência topográfica na altura média e área basal de talhões de *Pinus taeda* L.** 10 f. Monografia (graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2016.

SANQUETTA, C.R.; CORTE, A.P.D.; JACON, A.D. Crown area and trunk diameter relationship for tree species at a mixedaraucaria natural forest in the mid-southern Parana State, Brazil. **Floresta**, 2011.

SANQUETTA, C.R.; WATZLAWICK, L.F.; CORTE, A.P.D.; FERNANDES, L.A.V.; SIQUEIRA, J.D.P. **Inventários florestais: planejamento e execução**, 316 p. 2009.

SANTI, E.; PALOSCIA, S.; PETTINATO, S.; FONTANELLI, G.; MURA, M.; ZOLLI, C.; MASELLI, F.; CHIESI, M.; BOTAI, L.; CHIRICI, G. The potential of multifrequency SAR images for estimating forest biomass in Mediterranean areas, **Remote Sensing of Environment**, 200, p.63-73, 2017.

SANTOS, M. N. DOS; PINAGÉ, E. R.; LONGO, M.; ARAUJO, L. S.; KELLER, M. Efeito de borda caracterizado com uso de dados LiDAR em uma paisagem florestal degradada no município de Paragominas (PA). **Anais...** Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, v. 17., 2015.

SANTOS, M. N.; PINAGÉ, E. R.; LONGO, M.; ARAUJO, L. S. de; ADAMI, M.; MORTON, D.; KELLER, M. Lidar-based assessment of forest edge effects across a degraded landscape in the Brazilian Amazon. **Embrapa**, 2015.

SATO, L. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; KELLER, M.; SANTOS, M. N. DOS; CRUZ DE ARAGÃO, L. E. O. E. Análise da relação entre dados de LiDAR e de

biomassa florestal no sudoeste da Amazônia. **Anais...** Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, v.17., 2015.

SATO, L. Y.; GOMES, V.C.F.; SHIMABUKURO, Y.E.; KELLER, M.; ARAI, E.; SANTOS, M.; BROWN, L.F.; OLIVEIRA, L.E.; ARAGÃO, C. Post-Fire Changes in Forest Biomass Retrieved by Airborne LiDAR in Amazonia. **Remote Sensing**, v.8, p.810-839, 2016

SCHIMALESKY, V.; CENTENO, J.A.S. Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação: estudo de caso. **Revista Floresta**, v.38, n.04, p.597- 606, 2008.

SCHIMALSKI, V. Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a laser em uma região coberta por vegetação: um estudo de caso. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, 2007.

SCHNEIDER, F.D.; KUKENBRINK, D.; SCHAEPMAN, M.E.; SCHIMEL, D.S. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-ranging LiDAR. **Agricultural and forest meteorology**, v.268, p.249-259, 2019.

SILVA, C. A. Carbono na parte aérea de plantios de Eucalyptus spp. - em nível de árvore por amostragem destrutiva e para talhões inteiros após o ajuste de métricas LiDAR. 153f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de São Paulo, 2013.

SILVA, C.A.; GARCIA, S.S.M.; LABRIERE, N.; KLAUBERG, C.; FERRAZ, A.; MEYER, V.; JEFFERY, K.J.; ABERNETHY, K.; WHITE, L.; ZHAO, K.; LEWIS, L.S.; HUDAK, A. Comparison of Small-and Large Footprint LiDAR characterization of Tropical Forest Aboveground Structure and Biomass: A case study from Central Gabon, **IEE Journal of selected topics in applied earth observations and Remote Sensing**, v.11, n.10, 3512-3526, 2018.

SILVA, C.A.; KLAUBERG, C.; MENDONÇA, B.A.F.; CARVALHO, S.P.C. Efeito da densidade de pontos LiDAR na predição da altura em plantações de Pinus taeda L., **Scientia Forestalis**, v.45, n.115, p.481-492, 2017.

SILVA, C.A. A principal component approach for predicting the stem volume in Eucalyptus plantations in Brazil using airborne LiDAR data. **Forestry: An International Journal of Forest Research**. 89, 4, 422, Aug. 2016.

SILVA, C.A.; KLAUBERH, C.; HUDAK, A.; VIERING, L.A.; FENNEMA, .S.J.; CORTE, A.P. Modeling and mapping basal area of Pinus taeda L. plantation using airborne LiDAR data. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 2017.

SILVA, G.F.; CURTO, R.D.A.; SOARES, C.P.B.; PIASSI, L.C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais, **Revista árvore**, v.36, n.2, p.341-348, 2012.

SIMONSE, M. Automatic Determination of Forest Inventory Parameters Using Terrestrial Laserscanning. **Institute for Forest Growth**, p. 1–7, 2003.

SINGH, K.K.; CHEN, G.; MCCARTER, J.B.; MEENTEMEYER, R.K.; Effects of LiDAR point density and landscape context on estimates of urban forest biomass, **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p.310-322. 2015.

SOARES, C.P.B.; NETO, F.D.P; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: Editora UFV, 276p., 2006.

SRINIVASAN, S.; POPESCU, C.S.; ERIKSSON, M.; SHERIDAN, D.R.; KU, N. Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level high. **Remote Sensing**, 2015.

STOVALL, A.E.L.; VORSTER, A.G.; ANDERSON, R.S.; EVANGELISTA, P.H.; SHUGART, H.H. Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR, **Remote Sensing of Environment**, v.200, p.31-42, 2017.

TANAGO, J.G.; LAU, A.; BARTHOLOMEUS, H.; HEROLD, M.; AVITABILE, V.; RAUMONEN, P.; MARTIUS, C.; GOODMAN, R.C.; DISNEY, M.; MANURI, S.; BURT, A.; CALDERS, K. Estimation of above-ground biomass of large tropical trees with terrestrial LiDAR. **Methods in Ecology and Evolution**, 223-234, 2017.

TELLING, J.; LIDA, A.; HARTZELL, GLENNIE, C. Review of Earth science Research using terrestrial laser scanning, **Earth Science Reviews**, v.167, p.35-68, 2017.

TESFAMICHAEL, S.G.; AARDT, J.V.; ROBERTS, W.; AHMED, F. Retrieval of narrow-range LAI of at multiple lidar point densities: Application on Eucalyptus grandis plantation, **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, v.70, p.93-104, 2018

THOMAS, C.; ANDRADE, C.M.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, V.16, p. 319-327, 2006.

TORRESAN, C.; CHIAVETTA, U.; HACKENBERG, J. Applying quantitative structure models to plot-based terrestrial laser data to assess dendrometric parameters in dense mixed forests. **Forest Systems**, v.27, 2018.

ULABY, F.T., WHITT, M.W., DOBSON, M.C. Measuring the propagation properties of a forest canopy using a polarimetric scatterometer. **IEEE Trans. Antenna Propag.** AP-38 (2), 251–258, 1990.

VAN DER ZANDE, D., HOET, W.; JONCKHEERE, I.; VAN AARDT, J.; COPPIN, P. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. **Agricultural and Forest Meteorology**, p.147-160, 2006.

VAN LEEUWEN, M.; NIEUWENHUIS, M. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. **European Journal of Forest Research**, v. 129, n. 4, p. 749–770, 2010.

VIERLING, L.A., XU, Y., EITEL, J.U., OLDOW, J.S. Shrub characterization using terrestrial laser scanning and implications for airborne LiDAR assessment. **Remote Sensing**, v.38, p.709–722, 2013.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKY, Z.; TURNER, D.; VOPEŇKA P. Assessment of forest structure using two UAV techniques: a comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. **Forests**, v.7, 2016.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; WATSON, C.; TURNER, D. Development of a UAV-LiDAR System with Application to forest inventory, **Remote Sensing**, v.4, p. 1519-1543, 2012.

WANG, D.; WAN, B.; LIU, J.; SU, Y.; GUO, Q.; QIU, P.; WU, X. Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast Hainan Island in

China Using na upscaling method from field plots, UAB-LiDAR data and Sentinel-2 Imagery. **Int J Appl Earth Obs Geoinformation**, v.85, 2020.

WATT, P.J.; DONOGUE, D.N.M. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. **International Journal Remote Sensing**, v.26, p.1437-1446, 2005.

WEZIK, P. The integration of the terrestrial and airborne laser scanning technologies in the semi-automated process of retrieving selected trees and forest stand parameters, **Ambiência**, 2012

WHITE, J.C.; COOPS, N.C.; WULDER, M.A.; VASTARANTA, M.; HILKER, T.; TOMPALSKI, P. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A review, **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.42, 2016.

WHITMORE, T.C. **The plant community as a working Mechanism**. Blackwell Scientific, Oxford, 92p., 1982.

WILKES, P.; LAU, A.; DISNEY, M.; CALDERS, K.; BURT, A.; TANAGO, J.G.; BARTHOLOMEUS, H.; BREDE, B.; HEROLD, M. Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots, **Remote Sensing of Environment**, v.196, p.140-153, 2017.

WUTKE, J.D. **Métodos para Avaliação de um Sistema Laser Scanner Terrestre**. 98f. Dissertação (Mestrado em ciências geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, 2006.

YANASE, L.M. **Análise posicional de alvos para varredura com Laser Scanner Terrestre**. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal Do Paraná, 2016.

ZANDONA, D.F. **Potencial uso de dados laser scanner aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas**. 82f. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2006.

ZEYBEK, M.; SANHOGLU, I. Point cloud filtering on UAV based point cloud, **Measurement**, v.133, p.99-111, 2019.



ZHANG, J., HUD, J., LIANE, J., FAN, Z., OUYANG, X., YE, W., 2016. Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring. **Biological Conservation**, v. 198, 2016.

## ANEXO 1 - CÓDIGO TREEQSM QUE FOI RODADO NO MATLAB

### Comandos base

```
QSM = treeqsm(P, inputs);
% P (Filtered) point cloud, (m_points x 3)-matrix, the rows
% give the coordinates of the points. % inputs Structure array containing the input
parameters
```

### Entrada de dados

```
%% QSM reconstruction parameters
% The following parameters can be varied and should be optimised (they
% can have multiple values given as vectors, e.g. [4 6]):
inputs.PatchDiam1 = 0.1; %
Patch size of the first uniform-size cover
inputs.PatchDiam2Min = [0.02 0.03];
% Minimum patch size of the cover sets
in the second cover
inputs.PatchDiam2Max = 0.06;
% Maximum cover set size in the stem's base in
the second cover
inputs.lcyl = [3 6];
% Relative (length/radius) length of the cylinders
inputs.FilRad = 3;
% Relative radius for outlier point filtering
% The following parameters can be varied and but usually can be kept as
% shown (i.e. little bigger than PatchDiam parameters):
inputs.BallRad1 = inputs.PatchDiam1+0.01; % Ball radius in the first
uniform-size cover generation
inputs.BallRad2 = inputs.PatchDiam2Max+0.01; % Maximum ball radius in the
second cover generation
% The following parameters can be usually kept fixed as shown:
```

```

inputs.nmin1 = 3;
% Minimum number of points in BallRad1-balls, generally
good value is 3
inputs.nmin2 = 1;
% Minimum number of points in BallRad2-balls, generally
good value is 1
inputs.OnlyTree = 1;
% If 1, point cloud contains points only from the tree
inputs.Tria = 1; % If 1, produces a triangulation
inputs.Dist = 1; % If 1,
computes the point-model distances
% Different cylinder radius correction options for modifying too large and
% too small cylinders:
% Traditional TreeQSM choices:
inputs.MinCylRad = 0.0025;
% Minimum cylinder radius, used particularly in
the taper corrections
inputs.ParentCor = 1;
% Radii in a child branch are always smaller than the
radii of the parent cylinder in the parent branch
inputs.TaperCor = 1;
% Use partially linear (stem) and parabola (branches)
taper corrections
% Growth volume correction approach introduced by Jan Hackenberg,
% allometry:  $GrowthVol = a \cdot Radius^b + c$ 
inputs.GrowthVolCor = 0; % Use growth volume (GV) correction
inputs.GrowthVolFac = 2.5; % fac-parameter of the GV-approach, defines upper
and lower bound. When using GV-approach, consider setting:
TaperCorr = 0, ParentCorr = 0, MinCylinderRadius = 0.
%% Other inputs

```

% These parameters don't affect the QSM-reconstruction but define what is  
 % saved, plotted, and displayed and how the models are named/indexed

inputs.name = 'pine';

% Name string for saving output files and naming  
 models

inputs.tree = 1;

% Tree index.

If modelling multiple trees, then they can be  
 indexed uniquely

inputs.model = 1;

% Model index, can separate models if multiple models with  
 the same inputs

inputs.savemat = 1;

% If 1, saves the output struct QSM as a matlab-file  
 into \result folder

% If name = 'pine', tree = 2, model = 5,

% the name of the saved file is 'QSM\_pine\_t2\_m5.mat'

inputs.savetxt = 1; % If 1, saves the models in .txt-files

inputs.plot = 1; % If 1,

plots the model, the segmentation of the point  
 cloud and distributions

inputs.disp = 2;

% Defines what is displayed during the reconstruction:

2 = display all; 1 = display name, parameters and  
 distances; 0 = display only the name

function A = average(X)

% Computes the average of columns of the matrix X

n = size(X,1);

if n > 1

    A = sum(X)/n;

else

```

    A = X;
End

%% Partition the point cloud into cubes
Min = double(min([P(:,1:2); Curve0(:,1:2)]));
Max = double(max([P(:,1:2); Curve0(:,1:2)]));
N = double(ceil((Max-Min)/rball)+5);
CC = floor([P(:,1)-Min(1) P(:,2)-Min(2)]/rball)+3; % cube coordinates of the
section points
% Sorts the points according a lexicographical order
S = [CC(:,1) CC(:,2)-1]*[1 N(1)]';
[S,I] = sort(S);
% Define "partition"
np = size(P,1);
partition = cell(N(1),N(2));
p = 1; % The index of the point under comparison
while p <= np
    t = 1;
    while (p+t <= np) && (S(p) == S(p+t))
        t = t+1;
    end
    q = I(p);
    partition{CC(q,1),CC(q,2)} = I(p:p+t-1);
    p = p+t;
end

%% Define segments using the previous points
CC = floor([Curve0(:,1)-Min(1) Curve0(:,2)-Min(2)]/rball)+3; % cube coordinates
of the seed points
I = CC < 3;
CC(I) = 3;
nc = size(Curve0,1); % number of sets
Dist = 1e8*ones(np,1); % distance of point to the closest center
SoP = zeros(np,1); % the segment the points belong to
Radius = rball^2;
for i = 1:nc
    points = partition(CC(i,1)-1:CC(i,1)+1,CC(i,2)-1:CC(i,2)+1);
    points = vertcat(points{:});
    V = [P(points,1)-Curve0(i,1) P(points,2)-Curve0(i,2)];
    dist = sum(V.*V,2);
    PointsInBall = dist < Radius;
    points = points(PointsInBall);
    dist = dist(PointsInBall);
    D = Dist(points);
    L = dist < D;
    I = points(L);
    Dist(I) = dist(L);
    SoP(I) = i;
end

```

```

%% Finalise the segments
% Number of points in each segment and index of each point in its segment
Num = zeros(nc,1);
IndPoints = zeros(np,1);
for i = 1:np
    if SoP(i) > 0
        Num(SoP(i)) = Num(SoP(i))+1;
        IndPoints(i) = Num(SoP(i));
    end
end
% Continue if enough non-empty segments
if nnz(Num) > 0.05*nc
    % Initialization of the "Seg"
    Seg = cell(nc,1);
    for i = 1:nc
        Seg{i} = zeros(Num(i),1);
    end
    % Define the "Seg"
    for i = 1:np
        if SoP(i) > 0
            Seg{SoP(i),1}(IndPoints(i),1) = i;
        end
    end
end

%% Define the new curve points as the average of the segments
Curve = zeros(nc,3); % the new boundary curve
Empty = false(nc,1);
for i = 1:nc
    S = Seg{i};
    if ~isempty(S)
        Curve(i,:) = mean(P(S,:),1);
        if norm(Curve(i,:)-Curve0(i,:)) > 1.25*dmax
            Curve(i,:) = Curve0(i,:);
        end
    else
        Empty(i) = true;
    end
end

%% Interpolate for empty segments
% For empty segments create points by interpolation from neighboring non-
empty
% segments
if any(Empty)
    for i = 1:nc
        if Empty(i)
            if i > 1 && i < nc
                k = 0;
                while i+k <= nc && Empty(i+k)
                    k = k+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

if i+k <= nc
    LineEle = Curve(i+k,:)-Curve(i-1,:);
else
    LineEle = Curve(1,:)-Curve(i-1,:);
end
if k < 5
    for j = 1:k
        Curve(i+j-1,:) = Curve(i-1,:)+j/(k+1)*LineEle;
    end
else
    Curve(i:i+k-1,:) = Curve0(i:i+k-1,:);
end
elseif i == 1
    a = 0;
        while Empty(end-a)
            a = a+1;
        end
        b = 1;
        while Empty(b)
            b = b+1;
        end
        LineEle = Curve(b,:)-Curve(nc-a,:);
        n = a+b-1;
        if n < 5
            for j = 1:a-1
                Curve(nc-a+1+j,:) = Curve(nc-a,:)+j/n*LineEle;
            end
            for j = 1:b-1
                Curve(j,:) = Curve(nc-a,:)+(j+a-1)/n*LineEle;
            end
        else
            Curve(nc-a+2:nc,1:2) = Curve0(nc-a+2:nc,1:2);
            Curve(nc-a+2:nc,3) = Curve0(nc-a+2:nc,3);
            Curve(1:b-1,1:2) = Curve0(1:b-1,1:2);
            Curve(1:b-1,3) = Curve0(1:b-1,3);
        end
    elseif i == nc
        LineEle = Curve(1,:)-Curve(nc-1,:);
        Curve(i,:) = Curve(nc-1,:)+0.5*LineEle;
    end
end
end
end

% Correct the height
Curve(:,3) = min(Curve(:,3));

% Check self-intersection
[Intersect,IntersectLines] = check_self_intersection(Curve(:,1:2));

```



```

% If self-intersection, try to modify the curve
j = 1;
while Intersect && j <= 5
    n = size(Curve,1);
    InterLines = (1:1:n)';
    NumberOfIntersections = cellfun('length',IntersectLines(:,1));
    I = NumberOfIntersections > 0;
    InterLines = InterLines(I);
    CrossLen = vertcat(IntersectLines{I,2});
    if length(CrossLen) == length(InterLines)
        LineEle = Curve([2:end 1],:)-Curve(1:end,:);
        d = sqrt(sum(LineEle.*LineEle,2));
        m = length(InterLines);
        for i = 1:2:m
            if InterLines(i) ~= n
                Curve(InterLines(i)+1,:) =
Curve(InterLines(i),:)+0.9*CrossLen(i)/d(InterLines(i))*LineEle(InterLines(i),:);
            else
                Curve(1,:) =
Curve(InterLines(i),:)+0.9*CrossLen(i)/d(InterLines(i))*LineEle(InterLines(i),:);
            end
        end
        [Intersect,IntersectLines] = check_self_intersection(Curve(:,1:2));
        j = j+1;
    else
        j = 6;
    end
end

%% Add new points if too large distances
LineEle = Curve([2:end 1],:)-Curve(1:end,:);
d = sum(LineEle.*LineEle,2);
Large = d > dmax^2;
m = nnz(Large);
if m > 0
    Curve0 = zeros(nc+m,3);
    Ind = zeros(nc+m,2);
    t = 0;
    for i = 1:nc
        if Large(i)
            t = t+1;
            Curve0(t,:) = Curve(i,:);
            if i < nc
                Ind(t,:) = [i i+1];
            else
                Ind(t,:) = [i 1];
            end
            t = t+1;
            Curve0(t,:) = Curve(i,:)+0.5*LineEle(i,:);
            if i < nc

```

```

        Ind(t,:) = [i+1 0];
    else
        Ind(t,:) = [1 0];
    end
else
    t = t+1;
    Curve0(t,:) = Curve(i,:);
    if i < nc
        Ind(t,:) = [i i+1];
    else
        Ind(t,:) = [i 1];
    end
end
end
end
Curve = Curve0;

else
    Ind = [(1:1:nc)' [(2:1:nc)'; 1]];
end

%% Remove new points if too small distances
nc = size(Curve,1);
LineEle = Curve([2:end 1],:)-Curve(1:end,:);
d = sum(LineEle.*LineEle,2);
Small = d < (0.333*dmax)^2;
m = nnz(Small);
if m > 0
    for i = 1:nc-1
        if ~Small(i) && Small(i+1)
            Ind(i,2) = -1;
        elseif Small(i) && Small(i+1)
            Small(i+1) = false;
        end
    end
    if ~Small(nc) && Small(1)
        Ind(nc,2) = -1;
        Ind(1,2) = -1;
        Small(1) = false;
        Small(nc) = true;
        I = Ind(:,2) > 0;
        Ind(2:end,1) = Ind(2:end,1)+1;
        Ind(I,2) = Ind(I,2)+1;

    end
    Ind = Ind(~Small,:);
    Curve = Curve(~Small,:);
end

else

```

```

    % If not enough new points, return the old curve
    Ind = [(1:1:nc)' [(2:1:nc)'; 1]];
    Curve = Curve0;
end

Segs = segment.segments;
SChi = segment.ChildSegment;
Rad = cylinder.radius;
Len = cylinder.length;
Sta = cylinder.start;
Axe = cylinder.axis;
CPar = cylinder.parent;
Added = cylinder.added;
CChi = cylinder.ChildCyls;
CiS = cylinder.CylsInSegment;
cylinder = rmfield(cylinder,{'ChildCyls','CylsInSegment'});

%% Branches
nc = size(Rad,1); % number of cylinder
ns = size(Segs,1); % number of segments
BOrd = zeros(ns,1); % Branch order of the branch
CiB = cell(ns,1); % Cylinders in each branch
BoC = zeros(nc,1); % Branch of cylinder
BOrdC = zeros(nc,1); % Branch order of the cylinder
CPiB = zeros(nc,1); % Cylinder's position inside the branch
C = CiS{1};
CiB{1} = C;
BoC(C) = 1;
CPiB(C) = (1:length(C))';
BVol = zeros(ns,1); % branch volume
BLen = zeros(ns,1); % branch length
BAng = zeros(ns,1); % branch angle
BHei = zeros(ns,1); % branch height
BAzi = zeros(ns,1); % azimuth of branch
BDia = zeros(ns,1); % branch diameter at the base
BDia(1) = 2*Rad(1);
BVol(1) = pi*sum(Len(C).*Rad(C).^2);
BLen(1) = sum(Len(C));

S = SChi{1}; % segments under inspection
b = 1; % branches determined so far
BO = 0; % branch order under inspection
while ~isempty(S)
    BO = BO+1;
    n = length(S);
    for j = 1:n
        C = CiS{S(j)};
        if ~isempty(C)
            b = b+1;

```

```

CiB{b} = C;
BOrd(b) = BO;
BoC(C) = b;
BOrdC(C) = BO;
CPiB(C) = (1:length(C))';
BVol(b) = pi*sum(Len(C).*Rad(C).^2);
BLen(b) = sum(Len(C));
BHei(b) = Sta(C(1),3)-Sta(1,3);
BAzi(b) = 180/pi*atan2(Axe(C(1),2),Axe(C(1),1));
BDia(b) = 2*Rad(C(1));
I = Added(C(1)); % if the first cylinder is added to fill gap,
                % use the second cylinder
if I
    FC = C(2);      % first cyl in the branch
    PC = CPar(C(I)); % parent cylinder of the branch
else
    FC = C(1);
    PC = CPar(FC);
end
if PC > 0
    BAng(b) = 180/pi*acos(Axe(FC,:)*Axe(PC,:));
end
end
end
S = vertcat(SChi{S});
end
CiB = CiB(1:b);
clear branch

%% Branching structure (topology, parent-child-relation)
branch.order = uint8(BOrd(1:b));
BPar = zeros(b,1);
for i = 1:b
    C = CiB{i};
    ChildCyls = unique(vertcat(CChi{C}));
    CB = unique(BoC(ChildCyls)); % Child branches
    BPar(CB) = i;
end
if b <= 2^16
    branch.parent = uint16(BPar);
else
    branch.parent = uint32(BPar);
end

%% Finish the definition of branch
branch.volume = single(1000*BVol(1:b)); % volumes in liters
branch.length = single(BLen(1:b)); % lengths in meters
branch.angle = single(BAng(1:b)); % angles in degrees
branch.height = single(BHei(1:b)); % heights in meters
branch.azimuth = single(BAzi(1:b)); % azimuths in angles

```

```
branch.diameter = single(BDia(1:b)); % diameters in meters
```

```
%% Add cylinder outputs
```

```
if b <= 2^16
```

```
    cylinder.branch = uint16(BoC);
```

```
else
```

```
    cylinder.branch = uint32(BoC);
```

```
end
```

```
cylinder.BranchOrder = uint8(BOrdC);
```

```
if max(CPiB) <= 2^8
```

```
    cylinder.PositionInBranch = uint8(CPiB);
```

```
else
```

```
    cylinder.PositionInBranch = uint16(CPiB);
```

```
end
```

```
function v = change_precision(v)
```

```
% Decrease the number of nonzero decimals in the vector v according to the  
% exponent of the number for displaying and writing.
```

```
n = length(v);
```

```
for i = 1:n
```

```
    if abs(v(i)) >= 1e3
```

```
        v(i) = round(v(i));
```

```
    elseif abs(v(i)) >= 1e2
```

```
        v(i) = round(10*v(i))/10;
```

```
    elseif abs(v(i)) >= 1e1
```

```
        v(i) = round(100*v(i))/100;
```

```
    elseif abs(v(i)) >= 1e0
```

```
        v(i) = round(1000*v(i))/1000;
```

```
    elseif abs(v(i)) >= 1e-1
```

```
        v(i) = round(10000*v(i))/10000;
```

```
    else
```

```
        v(i) = round(100000*v(i))/100000;
```

```
    end
```

```
end
```

```
if nargin == 3
```

```
    ms = 3;
```

```
elseif ms == 0
```

```
    ms = 3;
```

```
end
```

```
R = setdiff(R,P,'rows');
```

```
figure(fig)
```

```
plot3(P(:,1),P(:,2),P(:,3),'.b','Markersize',ms)
```

```
hold on
```

```
plot3(R(:,1),R(:,2),R(:,3),'.r','Markersize',ms)
```

```
hold off
```

```
axis equal
```

```

%set(gca,'Color',[0 0 0]);

% Determine indexes of points for faster definition of regions
BallSize = cellfun('length',cover.ball(Sets));
IndPoints = ones(nl,2); % indexes for points in each layer of the segment
for j = 1:nl
    IndPoints(j,2) = sum(BallSize(IndSets(j,1):IndSets(j,2)));
end
IndPoints(:,2) = cumsum(IndPoints(:,2));
IndPoints(2:end,1) = IndPoints(2:end,1)+IndPoints(1:end-1,2);
Base = Seg{1}; % the base of the segment
nb = IndPoints(1,2); % number of points in the base

% Reconstruct only large enough segments
if nl > 1 && np > nb && ns > 2 && np > 20 && ~isempty(Base)
    %% Determine the regions for cylinder fitting
    [Regs,cyl] = regions(P,Points,IndPoints,Seg,inputs,Fal);
    nc = numel(cyl.rad);

    %% Fit cylinders to the regions
    if nc > 0
        cyl = cylinder_fitting(P,Regs,cyl);
        nc = numel(cyl.rad);
    end

    %% Search possible parent cylinder
    if nc > 0 && si > 1
        [PC,cyl,added] =
parent_cylinder(SPar,SChi,CiS,Rad,Len,Sta,Axe,cyl,si);
        nc = numel(cyl.rad);
    elseif si == 1
        PC = zeros(0,1);
        added = false;
    else
        added = false;
    end

    %% Adjust cylinders
    if nc > 0
        cyl = adjustments(Rad,Len,Sta,Axe,cyl,PC,si,inputs);
    end

    %% Save the cylinders
    % if at least one acceptable cylinder, then save them
    I = sum(cyl.axe.*cyl.axe,2);
    J = sum(cyl.sta.*cyl.sta,2);
    Accept = nc > 0 && min(cyl.rad(1:nc)) > 0 && ~any(I == 0) && ~any(J ==
0);
    if Accept
        % If the parent cylinder exists, set the parent-child relations

```

```

    if ~isempty(PC)
        CPar(c) = PC;
        if CExt(PC) == c
            I = SoC(PC);
            SoC(c:c+nc-1) = I;
            CiS{I} = [CiS{I}; linspace(c,c+nc-1,nc)'];
        else
            CChi{PC} = [CChi{PC}; c];
            SoC(c:c+nc-1) = si;
            CiS{si} = linspace(c,c+nc-1,nc)';
        end
    else
        SoC(c:c+nc-1) = si;
        CiS{si} = linspace(c,c+nc-1,nc)';
    end

    Rad(c:c+nc-1) = cyl.rad(1:nc);
    Len(c:c+nc-1) = cyl.len(1:nc);
    Axe(c:c+nc-1,:) = cyl.axe(1:nc,:);
    Sta(c:c+nc-1,:) = cyl.sta(1:nc,:);
    CPar(c+1:c+nc-1) = linspace(c,c+nc-2,nc-1);
    CExt(c:c+nc-2) = linspace(c+1,c+nc-1,nc-1);
    Rad0(c:c+nc-1) = cyl.rad0(1:nc);
    if added
        Added(c) = true;
    end
    c = c+nc; % number of cylinders so far (plus one)

end
end
end
end
c = c-1; % number of cylinders

%% Define outputs
clear cylinder
cylinder.radius = single(Rad(1:c));
cylinder.length = single(Len(1:c));
cylinder.start = single(Sta(1:c,:));
cylinder.axis = single(Axe(1:c,:));
if c <= 2^16
    cylinder.parent = uint16(CPar(1:c));
    cylinder.extension = uint16(CExt(1:c));
else
    cylinder.parent = uint32(CPar(1:c));
    cylinder.extension = uint32(CExt(1:c));
end
cylinder.added = logical(Added(1:c));
cylinder.UnmodRadius = single(Rad0(1:c));
for si = 1:NumOfSeg

```

```

        if size(CiS{si},2) > 1
            CiS{si} = CiS{si}';
        end
    end
    cylinder.CylsInSegment = CiS;
    CChi = CChi(1:c,:);
    cylinder.ChildCyls = CChi;

    % Growth volume correction
    if inputs.GrowthVolCor && c > 0
        cylinder = growth_volume_correction(cylinder,inputs);
    end

end % End of main function

function [Regs,cyl] = regions(P,Points,Ind,Seg,inputs,Fal)

% Define the subregions of the segment for cylinder fitting

nl = max(size(Seg)); % number of cover set layers in the segment
if nl > 3
    %% Define each region with approximate relative length of lcyl

    % Define first region
    Fal(Points) = true;
    Test = Points(Ind(1,1):Ind(4,2));
    Bot = Points(Ind(1,1):Ind(2,2));
    Bot = average(P(Bot,:));
    Top = Points(Ind(3,1):Ind(4,2));
    Top = average(P(Top,:));
    V = Top-Bot;
    [d,~,h] = distances_to_line(P(Test,:),V,Bot);
    [~,~,ht] = distances_to_line(Top,V,Bot);
    I = h <= ht;
    R = median2(d(I));
    J = d < inputs.FilRad*R;
    I = I&J;
    R = median2(d(I));
    L = max(h(I))-min(h);
    i = 4; i0 = 1;
    while (i <= nl-1 && L < inputs.lcyl*R) || (i <= nl-1 && nnz(I) < 30)
        top = Points(Ind(i,1):Ind(i,2));
        Top = average(P(top,:));
        V = Top-Bot;
        i = i+1;
        Test = Points(Ind(i0,1):Ind(i,2));
        [d,~,h] = distances_to_line(P(Test,:),V,Bot);
        [~,~,ht] = distances_to_line(Top,V,Bot);
        I = h <= ht;
    end
end

```



```

    R = median2(d(I));
    J = d < inputs.FilRad*R;
    I = I&J;
    R = median2(d(I));
    L = max(h(I))-min(h);
end
Test = Test(I);
if i == 4 && L/R > inputs.lcyl
    NL = 3;
else
    NL = i;
end
% Initialize regions and cylinders
n = ceil(3*nl/NL);
Regs = cell(n,1);
Regs{1} = Test;
Fal(Test) = false;
Axes = zeros(n,3);
Axes(1,:) = V'/norm(V);
Starts = zeros(n,3);
Starts(1,:) = Bot+min(h)*Axes(1,:);
Rads = zeros(n,1);
Rads(1) = R;
Lengs = zeros(n,1);
Lengs(1) = L;

% Define the other regions
t = 1;
i0 = NL-1;
i = NL+ceil(NL/3);
while i <= nl-1
    k = ceil(NL/3);
    Bot = Top;
    top = Points(Ind(i,1):Ind(i,2));
    Top = average(P(top,:));
    V = Top-Bot;
    i = i+1;
    Test = Points(Ind(i0,1):Ind(i,2));
    [d,~,h] = distances_to_line(P(Test,:),V,Bot);
    [~,~,ht] = distances_to_line(Top,V,Bot);
    I = h <= ht;
    J = h >= 0;
    I = I&J;
    if nnz(I) < 3
        I = h >= 0;
    end
    R = median2(d(I));
    if R == 0
        R = average(d(I));
        if R == 0

```

```

        R = max(d(I));
        if R == 0
            R = mad(d);
        end
    end
end
J = d < inputs.FilRad*R;
I = I&J;
R = median2(d(I));
L = norm(V);
k = k+1;
while (i <= nl-1 && L < inputs.lcyl*R && k <= NL) || (i <= nl-1 && nnz(I) <
20)
    top = Points(Ind(i,1):Ind(i,2));
    Top = average(P(top,:));
    V = Top-Bot;
    i = i+1;
    Test = Points(Ind(i0,1):Ind(i,2));
    [d,~,h] = distances_to_line(P(Test,:),V,Bot);
    [~,~,ht] = distances_to_line(Top,V,Bot);
    I = h <= ht;
    J = h >= 0;
    I = I&J;
    if nnz(I) < 3
        I = h >= 0;
    end
    R = median2(d(I));
    if R == 0
        R = mean(d(I));
        if R == 0
            R = max(d(I));
            if R == 0
                R = mad(d);
            end
        end
    end
    J = d < inputs.FilRad*R;
    I = I&J;
    R = median2(d(I));
    L = norm(V);
    k = k+1;
end
if i >= nl-1
    Test = Points(Ind(i0,1):Ind(nl,2));
    [d,~,h] = distances_to_line(P(Test,:),V,Bot);
    I = h >= 0;
    R = median2(d(I));
    if R == 0
        R = mean(d(I));
        if R == 0

```

```

        R = max(d(I));
        if R == 0
            R = mad(d);
        end
    end
end
J = d < inputs.FilRad*R;
I = I&J;
R = median2(d(I));
L = max(h(I));
Test = Test(I);
I = Fal(Test);
Test = Test(I);
if length(Test) >= 20
    t = t+1;
    Regs{t} = Test;
    Axes(t,:) = V'/norm(V);
    Starts(t,:) = Bot;
    Rads(t) = R;
    Lengs(t) = L;
else
    Regs{t} = [Regs{t}; Test];
end
else
    Test = Test(I);
    I = Fal(Test);
    Test = Test(I);
    if length(Test) >= 20
        t = t+1;
        Regs{t} = Test;
        Axes(t,:) = V'/norm(V);
        Starts(t,:) = Bot;
        Rads(t) = R;
        Lengs(t) = L;
    else
        Regs{t} = [Regs{t}; Test];
    end
end
end
i0 = i-1;
i = i0+ceil(NL/3);
end
Axes = Axes(1:t,:);
V = Starts(2:t,:)-Starts(1:t-1,:);
L = sqrt(sum(V.*V,2));
Axes(1:t-1,:) = [V(:,1)./L V(:,2)./L V(:,3)./L];
Starts = Starts(1:t,:);
Rads = Rads(1:t);
Lengs = Lengs(1:t);
Lengs(1:t-1) = L;
Regs = Regs(1:t);

```

```

else
    %% Define a region for small segments
    % Define the direction
    Bot = Points(Ind(1,1):Ind(1,2));
    Bot = average(P(Bot,:));
    Top = Points(Ind(nl,1):Ind(nl,2));
    Top = average(P(Top,:));
    Axes = Top-Bot;
    Axes = Axes/norm(Axes);

    % Define other outputs
    Regs = cell(1,1);
    Regs{1} = Points;
    Starts = average(P(Points,:));
    if max(size(Starts)) == 3
        [d,~,h] = distances_to_line(P(Points,:),Axes,Starts);
        Lengs = max(h)-min(h);
        R = median2(d);
        l = d < inputs.FillRad*R;
        Rads = median2(d(l));
        Height = P(Points,:)*Axes';
        hpoint = Starts*Axes';
        Starts = Starts-(hpoint-min(Height))*Axes;
        t = 1;
    else
        t = 0;
        Axes = 0;
        Rads = 0;
        Lengs = 0;
    end
end

end

if (t > 1) && (length(Regs{t}) < 11)
    Regs{t-1} = [Regs{t-1}; Regs{t}];
    t = t-1;
    Regs = Regs(1:t);
    Rads = Rads(1:t);
    Lengs = Lengs(1:t);
    Axes = Axes(1:t,:);
    Starts = Starts(1:t,:);
end

clear cyl
cyl.rad = Rads;
cyl.len = Lengs;
cyl.sta = Starts;
cyl.axe = Axes;
cyl.rad0 = Rads;

```

```

cyl.len0 = Lengs;
cyl.sta0 = Starts;
cyl.axe0 = Axes;

end % End of function

function cyl = cylinder_fitting(P,Regs,cyl)

% Fit cylinders to the regions
warning off
nr = size(Regs,1); % number of regions
ci = 0; % cylinder index
for j = 1:nr
    if (length(Regs{j}) > 10) && (norm(cyl.axe0(j,:)) > 0) % fit cylinders to large
        enough subsegs

            % Initial estimates
            Region = P(Regs{j},:); % the coordinate points used for fitting
            Axis0 = cyl.axe0(j,:); % cylinder axis
            Point0 = cyl.sta0(j,:); % point in the cylinder axis
            R0 = cyl.rad0(j,1);

            %% First fitting
            [R,L,Point,Axis,d,conv,rel] =
least_squares_cylinder(Region,Point0,Axis0,R0);

            % Conditions for second fitting and accepting the results
            I1 = conv & rel; % fitting converged and is reliable
            I2 = ~(isnan(R)|any(isnan(Point))|any(isnan(Axis))); % results are numbers
            mad = average(abs(d)); % mean distance to the fitted cylinder
            md = max(d); % maximum distance
            I3 = mad < R0 & abs(Axis0*Axis') > 0.8; % distances and the angle
            acceptable
            I4 = R < 3*R0 & R > 0; % radius is acceptable
            % second fitting if large enough absolute and relative "errors"
            SecondFitting = mad > 0.005 & mad/R > 0.05 & md/R > 0.2;
            AcceptFitting = I1&I2&I3&I4; % accept the first fitting
            SecondFitting = AcceptFitting & SecondFitting; % second cylinder fitting

            % Possible second fitting
            if SecondFitting

                if mad > 0.015 && R > 0.03
                    %% Try two shorter cylinders
                    % If large cylinder with large average error/distance, try
                    % replacing the cylinder with two shorter ones. Try five
                    % different combinations: 3-7, 4-6, 5-5, 6-4, 7-3 portions.
                    h = Region*Axis';
                    hmin = min(h);

```

```

% Best results
madb = mad;
Rb = R; Lb = L; Pointb = Point; Axisb = Axis;

% Try all the 5 combinations, save always the best one
for i = 1:5
    % Define the two subregions
    l = h <= hmin+(0.2+0.1*i)*L;
    Region1 = Region(l,:);
    Region2 = Region(~l,:);
    if nnz(l) > 10 && nnz(~l) > 10

        % Fit cylinders
        [R1,L1,Point1,Axis1,d1,conv1,rel1] =
least_squares_cylinder(Region1,Point,Axis,R);

        [R2,L2,Point2,Axis2,d2,conv2,rel2] =
least_squares_cylinder(Region2,Point,Axis,R);

        % Check if acceptable and also the best fits so far
        if conv1 && rel1 && conv2 && rel2
            % Fit is the best one if both mad1 and mad2 are
            % smaller than mad (from the one fitted
            % cylinder) and if their average is smaller
            % than the best madb
            mad1 = average(abs(d1));
            mad2 = average(abs(d2));
            AcceptFits = mad1 < mad && mad2 < mad &&
(mad1+mad2)/2 < madb;
            AcceptFits = AcceptFits && abs(Axis*Axis1') > 0.8 &&
abs(Axis*Axis2') > 0.7;
            AcceptFits = AcceptFits && R1 < 1.33*R && R2 < 1.33*R;
        else
            AcceptFits = false;
        end

        if AcceptFits
            % Update the best results
            madb = (mad1+mad2)/2;
            Rb = [R1; R2];
            Lb = [L1; L2];
            Pointb = [Point1; Point2];
            Axisb = [Axis1; Axis2];

            % Try second fit with outliers removed
            % Remove the outliers
            l = d1 < 0;
            d1(l) = 0.5*abs(d1(l));
            [~,J] = sort(d1);

```

```

I = J(1:ceil(0.7*length(J)));
k = 0;
while length(I) < 10
    k = k+1;
    I = J(1:ceil((0.7+0.1*k)*length(J)));
end
Region1 = Region1(I,:);

I = d2 < 0;
d2(I) = 0.5*abs(d2(I));
[~,J] = sort(d2);
I = J(1:ceil(0.7*length(J)));
k = 0;
while length(I) < 10
    k = k+1;
    I = J(1:ceil((0.7+0.1*k)*length(J)));
end
Region2 = Region2(I,:);

% Fit again
[R12,L1,Point1,Axis1,d1,conv1,rel1] =
least_squares_cylinder(Region1,Point1,Axis1,R1);

[R22,L2,Point2,Axis2,d2,conv2,rel2] =
least_squares_cylinder(Region2,Point2,Axis2,R2);

% Update the best results if ok fits
if conv1 && rel1 && conv2 && rel2 && R12 < 1.1*R1 && R22 <
1.1*R2

    Rb = [R12; R22];
    Lb = [L1; L2];
    Pointb = [Point1; Point2];
    Axisb = [Axis1; Axis2];
end
end
end
end
% Use the best results
R = Rb; L = Lb; Point = Pointb; Axis = Axisb;
else
%% Second fit with outliers removed
% Save the first fit results
R1 = R; L1 = L; Axis1 = Axis; Point1 = Point;

% Remove the outliers
I = d < 0;
d(I) = 0.5*abs(d(I));
[~,J] = sort(d);
I = J(1:ceil(0.7*length(J)));
k = 0;

```

```

while length(I) < 10
    k = k+1;
    I = J(1:ceil((0.7+0.1*k)*length(J)));
end
Region = Region(I,:);

% Second fitting
[R,L,Point,Axis,d,conv,rel] =
least_squares_cylinder(Region,Point0,Axis0,R0);

% Conditions for accepting the results
I1 = conv & rel; % fitting converged and is reliable
I2 = ~(isnan(R))|any(isnan(Point))|any(isnan(Axis)); % results are
numbers
mad = average(abs(d)); % mean distance to the fitted cylinder
I3 = mad < R0 & abs(Axis0*Axis') > 0.8; % distances and the angle
acceptable
I4 = R < 3*R0 & R > 0; % radius is acceptable
AcceptFitting = I1&I2&I3&I4; % accept the first fitting
end

if ~AcceptFitting
    % if the second fit was bad, use the results from the first fit
    R = R1; L = L1; Axis = Axis1; Point = Point1;
end

end

if AcceptFitting
    % Save the new fitted values
    if length(R) == 1
        ci = ci+1;
        cyl.rad(ci,1) = R;
        cyl.len(ci,1) = L;
        cyl.sta(ci,:) = Point;
        cyl.axe(ci,:) = Axis;
    else
        ci = ci+1;
        cyl.rad(ci:ci+1,1) = R;
        cyl.len(ci:ci+1,1) = L;
        cyl.sta(ci:ci+1,:) = Point;
        cyl.axe(ci:ci+1,:) = Axis;
        cyl.sta0 = [cyl.sta0(1:ci,:); cyl.sta0(ci:end,:)];
        cyl.sta0(ci+1,:) = cyl.sta0(ci,:)+cyl.len0(ci)/2*cyl.axe0(ci,:);
        cyl.axe0 = [cyl.axe0(1:ci,:); cyl.axe0(ci:end,:)];
        cyl.rad0 = [cyl.rad0(1:ci,:); cyl.rad0(ci:end,:)];
        cyl.len0 = [cyl.len0(1:ci,:)/2; cyl.len0(ci:end,:)/2];
        ci = ci+1;
    end
end
else

```



```

        % do not accept least square fittings, use initial estimates
        ci = ci+1;
        cyl.rad(ci,1) = cyl.rad0(ci,1);
        cyl.len(ci,1) = cyl.len0(ci,1);
        cyl.sta(ci,:) = cyl.sta0(ci,:);
        cyl.axe(ci,:) = cyl.axe0(ci,:);
    end
end
end
warning on

% if ci > 0 %nr-3
%   figure(6)
%   subplot(1,2,1)
%   plot_segs(P,Regs,6,5)
%   hold on
%   for i = 1:ci
%       draw(cyl.rad(i),cyl.len(i),cyl.axe(i,:),cyl.sta(i,:),1,20)
%   end
%   hold off
%   subplot(1,2,2)
%   plot_segs(P,Regs,6,5)
%   hold on
%   for i = 1:ci
%       draw(cyl.rad0(i),cyl.len0(i),cyl.axe0(i,:),cyl.sta0(i,:),1,20)
%   end
%   hold off
%   pause
% end

Rads = cyl.rad;
Lengs = cyl.len;
Starts = cyl.sta;
Axes = cyl.axe;

% PC    Parent cylinder
nc = numel(Rads);
added = false;
if SPar(si) > 0 % parent segment exists, find the parent cylinder
    s = SPar(si);
    PC = CiS{s}; % the cylinders in the parent segment
    % select the closest cylinders for closer examination
    if length(PC) > 1
        D = mat_vec_subtraction(-Sta(PC,:),-Starts(1,:));
        d = sum(D.*D,2);
        [~,I] = sort(d);
        if length(PC) > 3
            I = I(1:4);
        end
        pc = PC(I);
    end
end

```

```

    ParentFound = false;
elseif length(PC) == 1
    ParentFound = true;
else
    PC = zeros(0,1);
    ParentFound = true;
end

%% Check possible crossing points
if ~ParentFound
    pc0 = pc;
    n = length(pc);
    % Calculate the possible crossing points of the cylinder axis, when
    % extended, on the surfaces of the parent candidate cylinders
    x = zeros(n,2); % how much the starting point has to move to cross
    h = zeros(n,2); % the crossing point height in the parent
    for j = 1:n
        % Crossing points solved from a quadratic equation
        A = Axes(1,:)-(Axes(1,:)*Axe(pc(j),:))*Axe(pc(j),:);
        B = Starts(1,:)-Sta(pc(j),:)-(Starts(1,:)*Axe(pc(j),:))*Axe(pc(j),:)...
            +(Sta(pc(j),:)*Axe(pc(j),:))*Axe(pc(j),:);
        e = A*A';
        f = 2*A*B';
        g = B*B'-Rad(pc(j))^2;
        di = sqrt(f^2 - 4*e*g); % the discriminant
        s1 = (-f + di)/(2*e);
        s2 = (-f - di)/(2*e); % how much the starting point must be moved to
cross
        if isreal(s1) %% cylinders can cross
            % the heights of the crossing points
            x(j,:) = [s1 s2];
            h(j,1) = Starts(1,:)*Axe(pc(j),:)+x(j,1)*Axes(1,:)*Axe(pc(j),:)-...
                Sta(pc(j),:)*Axe(pc(j),:);
            h(j,2) = Starts(1,:)*Axe(pc(j),:)+x(j,2)*Axes(1,:)*Axe(pc(j),:)-...
                Sta(pc(j),:)*Axe(pc(j),:);
        end
    end

    %% Extend to crossing point in the (extended) parent
    I = x(:,1) ~= 0; % Select only candidates with crossing points
    pc = pc0(I); x = x(I,:); h = h(I,:);
    j = 1; n = nnz(I);
    X = zeros(n,3); %
    while j <= n && ~ParentFound
        if x(j,1) > 0 && x(j,2) < 0
            % sp inside the parent and crosses its surface
            if h(j,1) >= 0 && h(j,1) <= Len(pc(j)) && Lengs(1)-x(j,1) > 0
                PC = pc(j);
                Starts(1,:) = Starts(1,:)+x(j,1)*Axes(1,:);
                Lengs(1) = Lengs(1)-x(j,1);
            end
        end
        j = j + 1;
    end
end

```

```

    ParentFound = true;
elseif Lengs(1)-x(j,1) > 0
    if h(j,1) < 0
        X(j,:) = [x(j,1) abs(h(j,1)) 0];
    else
        X(j,:) = [x(j,1) h(j,1)-Len(pc(j)) 0];
    end
else
    X(j,:) = [x(j,1) h(j,1) 1];
end
elseif x(j,1) < 0 && x(j,2) > 0 && Lengs(1)-x(j,2) > 0
    % sp inside the parent and crosses its surface
    if h(j,2) >= 0 && h(j,2) <= Len(pc(j)) && Lengs(1)-x(j,2) > 0
        PC = pc(j);
        Starts(1,:) = Starts(1,:)+x(j,2)*Axes(1,:);
        Lengs(1) = Lengs(1)-x(j,2);
        ParentFound = true;
    elseif Lengs(1)-x(j,2) > 0
        if h(j,2) < 0
            X(j,:) = [x(j,2) abs(h(j,2)) 0];
        else
            X(j,:) = [x(j,2) h(j,2)-Len(pc(j)) 0];
        end
    else
        X(j,:) = [x(j,2) h(j,2) 1];
    end
elseif x(j,1) < 0 && x(j,2) < 0 && x(j,2) < x(j,1) && Lengs(1)-x(j,1) > 0
    % sp outside the parent and crosses its surface when extended
    % backwards
    if h(j,1) >= 0 && h(j,1) <= Len(pc(j)) && Lengs(1)-x(j,1) > 0
        PC = pc(j);
        Starts(1,:) = Starts(1,:)+x(j,1)*Axes(1,:);
        Lengs(1) = Lengs(1)-x(j,1);
        ParentFound = true;
    elseif Lengs(1)-x(j,1) > 0
        if h(j,1) < 0
            X(j,:) = [x(j,1) abs(h(j,1)) 0];
        else
            X(j,:) = [x(j,1) h(j,1)-Len(pc(j)) 0];
        end
    else
        X(j,:) = [x(j,1) h(j,1) 1];
    end
elseif x(j,1) < 0 && x(j,2) < 0 && x(j,2) > x(j,1) && Lengs(1)-x(j,2) > 0
    % sp outside the parent and crosses its surface when extended
    % backwards
    if h(j,2) >= 0 && h(j,2) <= Len(pc(j)) && Lengs(1)-x(j,2) > 0
        PC = pc(j);
        Starts(1,:) = Starts(1,:)+x(j,2)*Axes(1,:);
        Lengs(1) = Lengs(1)-x(j,2);
    end
end

```

```

        ParentFound = true;
    elseif Lengs(1)-x(j,2) > 0
        if h(j,2) < 0
            X(j,:) = [x(j,2) abs(h(j,2)) 0];
        else
            X(j,:) = [x(j,2) h(j,2)-Len(pc(j)) 0];
        end
    else
        X(j,:) = [x(j,2) h(j,2) 1];
    end
elseif x(j,1) > 0 && x(j,2) > 0 && x(j,2) < x(j,1) && Lengs(1)-x(j,1) > 0
    % sp outside the parent but crosses its surface when extended
    % forward
    if h(j,1) >= 0 && h(j,1) <= Len(pc(j)) && Lengs(1)-x(j,1) > 0
        PC = pc(j);
        Starts(1,:) = Starts(1,:)+x(j,1)*Axes(1,:);
        Lengs(1) = Lengs(1)-x(j,1);
        ParentFound = true;
    elseif Lengs(1)-x(j,1) > 0
        if h(j,1) < 0
            X(j,:) = [x(j,1) abs(h(j,1)) 0];
        else
            X(j,:) = [x(j,1) h(j,1)-Len(pc(j)) 0];
        end
    else
        X(j,:) = [x(j,1) h(j,1) 1];
    end
elseif x(j,1) > 0 && x(j,2) > 0 && x(j,2) > x(j,1) && Lengs(1)-x(j,2) > 0
    % sp outside the parent and crosses its surface when extended
    % forward
    if h(j,2) >= 0 && h(j,2) <= Len(pc(j)) && Lengs(1)-x(j,2) > 0
        PC = pc(j);
        Starts(1,:) = Starts(1,:)+x(j,2)*Axes(1,:);
        Lengs(1) = Lengs(1)-x(j,2);
        ParentFound = true;
    elseif Lengs(1)-x(j,2) > 0
        if h(j,1) < 0
            X(j,:) = [x(j,2) abs(h(j,2)) 0];
        else
            X(j,:) = [x(j,2) h(j,2)-Len(pc(j)) 0];
        end
    else
        X(j,:) = [x(j,2) h(j,2) 1];
    end
end
j = j+1;
end

if ~ParentFound && n > 0
    [H,l] = min(X(:,2));

```

```

X = X(l,:);
if X(3) == 0 && H < 0.1*Len(pc(l))
    PC = pc(l);
    Starts(1,:) = Starts(1,:)+X(1)*Axes(1,:);
    Lengs(1) = Lengs(1)-X(1);
    ParentFound = true;
else
    PC = pc(l);

    if nc > 1 && X(1) <= Rads(1) && abs(X(2)) <= 1.25*Len(PC)
        % Remove the first cylinder and adjust the second
        S = Starts(1,:)+X(1)*Axes(1,:);
        V = Starts(2,:)+Lengs(2)*Axes(2,:)-S;
        Lengs(2) = norm(V);      Lengs = Lengs(2:nc);
        Axes(2,:) = V/norm(V);   Axes = Axes(2:nc,:);
        Starts(2,:) = S;        Starts = Starts(2:nc,:);
        Rads = Rads(2:nc);
        nc = nc-1;
        ParentFound = true;
    elseif nc > 1
        % Remove the first cylinder
        Starts = Starts(2:nc,:);   Lengs = Lengs(2:nc);
        Axes = Axes(2:nc,:);      Rads = Rads(2:nc);
        nc = nc-1;
    elseif isempty(SChi{si})
        % Remove the cylinder
        nc = 0;
        PC = zeros(0,1);
        ParentFound = true;
        Rads = zeros(0,1);
    elseif X(1) <= Rads(1) && abs(X(2)) <= 1.5*Len(PC)
        % Adjust the cylinder
        Starts(1,:) = Starts(1,:)+X(1)*Axes(1,:);
        Lengs(1) = abs(X(1));
        ParentFound = true;
    end

    [Dist,~,DistOnLines] =
distances_between_lines(Starts(1,:),Axes(1,:),Sta(pc,:),Axe(pc,:));

    I = DistOnLines >= 0;
    J = DistOnLines <= Len(pc);
    I = I&J;
    if ~any(I)
        I = DistOnLines >= -0.2*Len(pc);
        J = DistOnLines <= 1.2*Len(pc);
        I = I&J;
    end
    if any(I)
        pc = pc(I);   Dist = Dist(I);   DistOnLines = DistOnLines(I);

```

```

[~,I] = min(Dist);
DistOnLines = DistOnLines(I);    PC = pc(I);
Q = Sta(PC,:)+DistOnLines*Axe(PC,:);
V = Starts(1,:)-Q;    L = norm(V);    V = V/L;
a = acos(V*Axe(PC,:));
h = sin(a)*L;
S = Q+Rad(PC)/h*L*V;
L = (h-Rad(PC))/h*L;
if L > 0.01 && L/Lengs(1) > 0.2
    nc = nc+1;
    Starts = [S; Starts];    Rads = [Rads(1); Rads];
    Axes = [V; Axes];    Lengs = [L; Lengs];
    added = true;
end
else
    V = -mat_vec_subtraction(Sta(pc,:),Starts(1,:));
    L = sqrt(sum(V.*V,2));
    V = [V(:,1)./L V(:,2)./L V(:,3)./L];
    A = V*Axes(1,:);
    [A,I] = max(A);
    L = L(I);    PC = pc(I);    V = V(I,:);
    a = acos(V*Axe(PC,:));
    h = sin(a)*L;
    S = Sta(PC,:)+Rad(PC)/h*L*V;
    L = (h-Rad(PC))/h*L;
    if L > 0.01 && L/Lengs(1) > 0.2
        nc = nc+1;
        Starts = [S; Starts];    Rads = [Rads(1); Rads];
        Axes = [V; Axes];    Lengs = [L; Lengs];
        added = true;
    end
end
end
end
else
    % no parent segment exists
    PC = zeros(0,1);
    display('No parent segment')
end

Rads = Rads(1:nc);
Lengs = Lengs(1:nc,:);
Axes = Axes(1:nc,:);
Starts = Starts(1:nc,:);

cyl.rad0 = Rads;
if nc > 0 && Lengs(1) ~= cyl.len0(1) && ~added
    cyl.sta0(1,:) = Starts(1,:);
elseif added
    cyl.sta0 = [Starts(1,:); cyl.sta0];

```

```

    cyl.axe0 = [Axes(1,:); cyl.axe0];
end

```

```

cyl.rad = Rads;
cyl.len = Lengs;
cyl.sta = Starts;
cyl.axe = Axes;

```

```

end % End of function

```

```

function cyl = adjustments(Rad,Len,Sta,Axe,cyl,PC,si,inputs)

```

```

Rads = cyl.rad;
Lengs = cyl.len;
Starts = cyl.sta;
Axes = cyl.axe;
Starts0 = cyl.sta0;
Axes0 = cyl.axe0;

```

```

nc = size(Rads,1);
Rads0 = Rads;

```

```

MinR = inputs.MinCylRad;
%% Determine the maximum radius based on parent branch
if ~isempty(PC)
    MaxR = 0.95*Rad(PC);
    MaxR = max(MaxR,MinR);
elseif si == 1
    % For the trunk use the maximum from the bottom cylinders
    a = min(3,nc);
    MaxR = 1.25*max(Rads(1:a));
else
    MaxR = 0.005;
end

```

```

%% Check maximum and minimum radii
I = Rads < MinR;
Rads(I) = MinR;
if inputs.ParentCor
    I = Rads > MaxR;
    Rads(I) = MaxR;
end

```

```

%% Use taper correction to modify radius of too small and large cylinders
if inputs.TaperCor
    if max(Rads) < 0.005

```

```

        %% Adjust radii of thin branches to be linearly decreasing
        if nc > 2

```

```

    r = sort(Rads);
    r = r(2:end-1);
    a = 2*mean(r);
    if a > max(r)
        a = min(0.01,max(r));
    end
    b = min(0.5*min(Rads),0.001);
    Rads = linspace(a,b,nc)';
else
    r = max(Rads);
    if nc == 1
        Rads = r;
    else
        Rads = [r; 0.5*r];
    end
end

elseif nc > 4
    %% Parabola adjustment of maximum and minimum
    % Define parabola taper shape as maximum radii
    % "a" is the number first radii used to determine base radius
    r0 = MinR;
    l = sum(Lengs(1:nc)); % branch length
    L = zeros(nc,1); % middle points of cylinder as cumulative length from
base
    for i = 1:nc
        if i > 1
            L(i) = Lengs(i)/2+sum(Lengs(1:i-1));
        else
            L(i) = Lengs(i)/2;
        end
    end
    a = 1;
    while L(a) < 0.1*L(end)
        a = a+1;
    end
    a = max(a,2);
    r = 1.05*sum(Rads(1:a))/a; % branch base radius

    if si > 1
        % Determine data "S" for parabola fitting
        b = round(nc/4);
        if b >= 3
            % use 3 first 1/4-length sections to define data points as mean
            % radii of those cylinders
            S = zeros(5,2);
            S(1,2) = r;
            l0 = 1;
            for i = 1:3
                [~,l] = min(abs(L-i/4*l));
            end
        end
    end
end

```



```

        S(i+1,1) = L(l);
        S(i+1,2) = 1.05*mean(Rads(l0:l));
        l0 = l+1;
    end
else
    j = 1;
    S = zeros(5,2);
    S(1,2) = r;
    for i = 1:3
        S(i+1,1) = L(round(j+b/2));
        S(i+1,2) = 1.05*sum(Rads(j:j+b-1))/b;
        j = j+b;
    end
end
end
S(5,:) = [l r0];

% Least square fitting of parabola to "S"
A = [sum(S(:,1).^4) sum(S(:,1).^2); sum(S(:,1).^2) 5];
y = [sum(S(:,2).*S(:,1).^2); sum(S(:,2))];
x = A\y;
R = x(1)*L.^2+x(2); % parabola
l = Rads > R;
Rads(l) = R(l); % change values larger than parabola-values
Q = 0.75*R;
l = Q < r0;
Q(l) = r0;
l = Rads < Q;
Rads(l) = Q(l);
elseif si == 1 && nc > 5
    % Define partially linear maximum taper curve data S with 8
    % sections
    a = 1;
    while L(a) < 0.06*L(end)
        a = a+1;
    end
    a = max(a,2);
    r = 1.2*max(Rads(1:a));
    b = round(nc/8);
    if b >= 3
        % use 6 first 1/8-length parts to define data points as mean
        % radii of those cylinders
        S = zeros(7,2);
        S(1,2) = r;
        l0 = 1;
        for i = 1:5
            [~,l] = min(abs(L-i/8*L));
            S(i+1,1) = L(l);
            S(i+1,2) = 1.05*mean(Rads(l0:l));
            if S(i+1,2) > S(i,2)
                S(i+1,2) = S(i,2);
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        l0 = l+1;
    end
else
    j = 1;
    S = zeros(7,2);
    S(1,2) = r;
    for i = 1:5
        S(i+1,1) = L(round(j+b/2));
        S(i+1,2) = 1.05*sum(Rads(j:j+b-1))/b;
        j = j+b;
    end
end
end
S(7,:) = [l r0];
% Check the radii against the taper data (minimum allowed is 70% of
maximum)
j = 1;
for i = 1:nc
    R = S(j,2)+(L(i)-S(j,1))/(S(j+1,1)-S(j,1))*(S(j+1,2)-S(j,2));
    if Rads(i) > R
        Rads(i) = R;
    elseif Rads(i) < 0.7*R
        Rads(i) = 0.7*R;
    end
    if j < 6 && L(i) >= S(j+1,1)
        j = j+1;
    end
end
end
else
    % Define partially linear maximum taper curve data S with 2
    % sections
    r = 1.1*mean(Rads(1));
    S = zeros(3,2);
    S(1,2) = r;
    S(2,:) = [L(3) 1.05*(Rads(2)+Rads(3))/2];
    S(3,:) = [l r0];
    % Check the radii against the taper data (minimum allowed is 70% of
    maximum)
    j = 1;
    for i = 1:nc
        R = S(j,2)+(L(i)-S(j,1))*(S(j+1,2)-S(j,2))/(S(j+1,1)-S(j,1));
        if Rads(i) > R
            Rads(i) = R;
        elseif Rads(i) < 0.7*R
            Rads(i) = 0.7*R;
        end
        if j < 3 && L(i) > S(j+1,1)
            j = j+1;
        end
    end
end
end
end

```

```

    end
else
    %% Adjust radii of short branches to be linearly decreasing
    if nc > 2
        a = 2*(Rads(1)+Rads(2))/2;
        if a > max(Rads)
            a = max(Rads);
        end
        b = MinR;
        Rads = linspace(a,b,nc)';
    else
        r = max(Rads);
        if nc == 1
            Rads = r;
        else
            Rads = [r; 0.5*r];
        end
    end
end

end
end

%% Check big adjustments of starting points
% If modification of the radius was large, then adjust the starting point
% to the initial value
for i = 1:nc
    d = abs(Rads(i)-Rads0(i));
    if d > 0.01 || d > 0.5*Rads0(i)
        S0 = Starts0(i,:);
        S = Starts(i,:);
        A0 = Axes0(i,:);
        d = distances_to_line(S,A0,S0);
        if d > 0.01 || d > 0.5*Rads0(i)
            Starts(i,:) = S0;
            Axes(i,:) = A0;
        end
    end
end
end

%% Continuous branches
% Make cylinders properly "continuous" by moving the starting points
% First check, move the starting point to the plane defined by parent
% cylinder's top
if nc > 1
    for j = 2:nc
        U = Starts(j,:)-Starts(j-1,:)-Lengs(j-1)*Axes(j-1,:);
        if (norm(U) > 0.0001)
            % First define vector V and W which are orthogonal to the
            % cylinder axis N
            N = Axes(j,:);

```

```

        if norm(N) > 0
            [V,W] = orthonormal_vectors(N);
            % Now define the new starting point
            x = [N V W]\U';
            Starts(j,:) = Starts(j,:)-x(1)*N';
            if x(1) > 0
                Lengs(j) = Lengs(j)+x(1);
            elseif Lengs(j)+x(1) > 0
                Lengs(j) = Lengs(j)+x(1);
            end
        end
    end
end
end
end

%% Connect far away first cylinders to the parent
if si > 1
    [d,V,h,B] = distances_to_line(Starts(1,:),Axe(PC,:),Sta(PC,:));
    d = d-Rad(PC);
    if d > 0.01
        S = Starts(1,:);
        E = S+Lengs(1)*Axes(1,:);
        V = Rad(PC)*V/norm(V);
        if h >= 0 && h <= Len(PC)
            Starts(1,:) = Sta(PC,:)+B+V;
        elseif h < 0
            Starts(1,:) = Sta(PC,:)+V;
        else
            Starts(1,:) = Sta(PC,:)+Len(PC)*Axe(PC,:)+V;
        end
        Axes(1,:) = E-Starts(1,:);
        Lengs(1) = norm(Axes(1,:));
        Axes(1,:) = Axes(1,:)/Lengs(1);
    end
end

cyl.rad = Rads;
cyl.len = Lengs;
cyl.sta = Starts;
cyl.axe = Axes;

end % End of function

```

### Filtragem de pontos

```
Pass = filtering(P0, r1, n1, d2, r2, n2, Scaling, AllPoints); P = P0(Pass,:);
```